

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الكيمياء



مذكرة مقدمة ضمن استكمال متطلبات نيل شهادة ماستر أكاديمي في الكيمياء

التخصص: كيمياء تحليلية

من إعداد: سخاء محسن

نور الهدى روي

بغنوان

تحضير وتوصيف كربون نشط من قشور الرمان وتقييم كفاءته
في إزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية

نوقشت علنا يوم: 2026/06/18

أمام لجنة المناقشة

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ تعليم عالي	علي ذوادي
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ محاضر (أ)	خولة شاوش
مؤطرا	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ تعليم عالي	مسعودة علاوي
مساعد مؤطر	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	أستاذ تعليم عالي	لويزة زنخري

السنة الجامعية: 2025 – 2026

الإهداء

بسم الله والصلاة والسلام على نبيه محمد ﷺ خير الخلق

الحمد لله ما تمّ جهد ولا ختم سعي إلا بفضلته وما تخطى العبد من عقبات
وصعوبات إلا بتوفيقه

بفضل الله أتممت مسيرتي الجامعية أهدي عملي هذا:

إلى نفسي الطموحة، ابتدأت مسيرتي بطموح وانتهت بنجاح.

إلى الرجل العظيم، إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، رحل دون أن يشاركني
فرحتي أبي رحمه الله.

إلى سندي في هذه الحياة، مصدر الأمان الذي استمد منه قوتي، إلى نور عيني
وفخري، إلى من كانت الداعم الأول لي في كل صغيرة وكبيرة أمي العزيزة.
حفظها الله ورعاها.

إلى سندي، إلى أعلى ما أملك.....أخي سالم وحليلته، وأختي فاطمة وحليلها.
إلى براعم العائلة إياد، يوسف ويسرى.

وأخص بالذكر صديقتي نور الهدى التي تقاسمت معها هذا العمل المتواضع
كاتفتني ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح في مسيرتنا العلمية.
إلى من كان لهم أثر جميل على حياتي وأحبهم قلبي ونسأهم قلبي.

سخاء

الاقراء

الحمد لله حمداً كثيراً

بعد إتمام هذا العمل لا يسعني إلا أن أهدي ثمرة نجاحي وتتويجي إلى من حملتني تسعا وأرضعتني حولين وسهرت على راحتي ليالٍ طوال وأجهدت نفسها لسعادتي

إليك أيتها العزيزة الغالية أمي.

إلى الذي أنار طريقي وأبهج دربي وكان مثلي الأعلى في الحياة إلى الذي حرم نفسه وأعطاني ولم يدخر جهداً في سبيل أن يراني في هذا النجاح إليك

أبي العزيز حفظه الله.

وإلى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة إلى من تحمل أعينهم ذكريات طفولتي إلى رياحين حياتي إخوتي.

إلى من جمعتني به الأقدار وكان سندا بصبره وتشجيعه ودعمه المتواصل

إليك زوجي الغالي.

إلى التي تحملت معي متاعب هذا الجهد وتقاسمت معها شقاءه رفيقتي ونصفي الثاني في العمل حبيبتي سناء.

وإلى كل من ساعدني في هذا العمل من بعيد أو من قريب إليكم جميعاً أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع

نور الهدى

شكر وعرفان

بعد إنجاز هذا العمل لا يسعنا إلا أن نحمد الله عزّ وجل الذي أمدنا بالقوة والصبر على مواصلته وإتمامه.

بسعدينا أن نتقدم بجزيل الشكر ومظيم التقدير وبالخالص الثناء والعرفان للأستاذة مسعودة علاوي لتفضلها بالإشراف على هذه المذكرة والأستاذة المساعدة لوبيزة زنجري.

كما لا يسعنا إلا أن نتوجه بالشكر للجنة المناقشة الأستاذين الفاضلين علي ذوايدي وخولة شاوش على قبولهما مناقشة مذكرتنا المتواضعة وعلى ما قدماه من ملاحظات التي من شأنها أن تثري وتضفي قيمة لهذه المذكرة.

كما نشكر مخبر التلووث ومعالجة النفايات على مساعدته.

كما نشكر أعضاء مخبر الأرضية التقنية للتحليل الفيزيائية والكيميائية (CRAPC) ونخص بالذكر السيد المدير حكيم بلخالفه والأستاذ يوسف رحمانبي على المجهودات المبذولة.

كما نعرب عن بالغ شكرنا إلى كل من ساعدنا من قريب أو بعيد بنصيحة أو توجيه أو حتى كلمة محفزة كان لها أثر في إتمام هذا العمل نذكر منهم الأستاذين مصطفى بن علي وعبد القادر بن منين.

ونتوجه بالشكر الجزيل إلى زملائنا في الدفعة لكل ما قدموه من عون ومساعدة ونخص بالذكر منار بشكي.

قائمة الرموز والمختصرات

الاختصار	التسمية الكاملة	التسمية بالعربية
C_e	Concentration d'équilibre	تركيز الاتزان
C_0	Concentration initiale	التركيز الابتدائي
CEFIC	Conseil Européen des Fédérations l'Industrie Chimique	المجلس الأوروبي لاتحادات الصناعات الكيميائية
EDX	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy	مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه
K_F	Coefficient d'adsorption de Freundlich	ثابت فروندليش
K_L	Coefficient d'adsorption de Langmuir	ثابت لانغموير
q_e	Quantité d'adsorption	سعة الامتزاز
Q_{max}	Capacité d'adsorption maximal	سعة الامتزاز القصوى
R	Rendement	المردود
R_L	Facteur d'équilibre	عامل الاتزان
SEM	Scanning Electron Microscopy	المجهر الإلكتروني الماسح

قائمة الجداول

الصفحة	العنوان	الرقم
7	تصنيف المسامات للكربون النشط	(1-I)
13	التصنيف النظامي لنبات الرمان	(2-I)
15	مقارنة بين الامتزاز والامتصاص	(3-I)
25	يوضح المواد والأجهزة المستعملة في العمل التجريبي	(1-II)
41	ثوابت نموذج لانغموير	(1-III)
42	ثوابت نموذج فروندليش	(2-III)
44	نتائج دراسات سابقة حول تأثير pH ودرجة الحرارة على كفاءة امتزاز أزرق الميثيلين	(3-III)
52	نسبة العناصر الكيميائية في العينات بواسطة EDX	(4-III)

قائمة الأشكال

الصفحة	العنوان	الرقم
6	صورة الكربون النشط	(1-I)
7	يوضح بنية المسامات في الكربون النشط	(2-I)
10	صورة شجرة الرمان	(3-I)
11	صورة أوراق شجرة الرمان	(4-I)
11	صورة أزهار شجرة الرمان	(5-I)
12	صورة ثمار الرمان	(6-I)
12	صورة قشور ثمار الرمان	(7-I)
13	صورة بذور الرمان	(8-I)
14	خريطة التوزيع الجغرافي العالمي لنبات الرمان	(9-I)
19	الصيغة الكيميائية لصبغة أزرق الميثيلين	(10-I)
19	صورة لصبغة أزرق الميثيلين	(11-I)
28	محلول صبغة أزرق الميثيلين الأم	(1-II)
29	صورة توضح المحاليل على جهاز الرج أثناء عملية الامتزاز	(2-II)
33	منحنى المعايرة لصبغة أزرق الميثيلين	(1-III)
34	يوضح نتائج اختبار جرعة الكربون النشط لامتزاز صبغة أزرق الميثيلين	(2-III)
34	منحنى تأثير جرعة الكربون النشط على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز	(3-III)
35	يوضح نتائج اختبار زمن التلامس على امتزاز صبغة أزرق الميثيلين	(4-III)
36	منحنى تأثير زمن التلامس على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز	(5-III)
37	يوضح نتائج اختبار التركيز الابتدائي على عملية الامتزاز	(6-III)
37	منحنى تأثير تركيز الصبغة الابتدائي على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز	(7-III)
38	منحنى ايزوتارم الامتزاز	(8-III)
40	مطابقة نموذج لانغموير على نتائج ايزوتارم الامتزاز	(9-III)
42	مطابقة نموذج فروندليش على نتائج ايزوتارم الامتزاز	(10-III)
45	طيف FTIR لمسحوق قشور الرمان الخام	(11-III)
46	طيف FTIR للكربون النشط قبل الامتزاز	(12-III)
47	طيف FTIR للكربون النشط بعد الامتزاز	(13-III)
48	مطابقة أطياف FTIR للعينات المدروسة	(14-III)
49	صور بالماسح الالكتروني لقشور الرمان الخام	(15-III)
49	صور بالماسح الالكتروني لقشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك	(16-III)
49	صور بالماسح الالكتروني للكربون النشط قبل الامتزاز	(17-III)
49	صور بالماسح الالكتروني للكربون النشط بعد الامتزاز	(18-III)
52	طيف EDX لقشور الرمان الخام	(19-III)
52	طيف EDX لقشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك	(20-III)
52	طيف EDX للكربون النشط المحضر	(21-III)

قائمة المخططات

الصفحة	العنوان	الرقم
8	يوضح بعض أجهزة توصيف الكربون النشط	(1-I)
27	البروتوكول التجريبي لتحضير الكربون النشط من قشور الرمان	(1-II)

الفهرس

i.....	الاهداء
ii.....	الاهداء
iii.....	شكر و عرفان
iv.....	قائمة الرموز والمختصرات
v.....	قائمة الجداول
vi.....	قائمة الأشكال
vii.....	قائمة المخططات
2.....	مقدمة عامة
4.....	المراجع

الفصل الأول

6.....	1-I. عموميات حول الكربون النشط
6.....	1-1-I. تمهيد
6.....	2-1-I. تعريف الكربون النشط
6.....	3-1-I. تركيب وبنية الكربون النشط
8.....	4-1-I. خصائص الكربون النشط
9.....	5-1-I. طرق تحضير الكربون النشط
9.....	6-1-I. تطبيقات الكربون النشط
10.....	2-I. الدراسة الايثنوصيدلانية لنبات الرمان
10.....	1-2-I. الوصف المورفولوجي لنبات الرمان
13.....	2-2-I. التصنيف العلمي لنبات الرمان
14.....	3-2-I. التوزيع الجغرافي لنبات الرمان
14.....	4-2-I. الاستعمالات التقليدية لنبات الرمان
14.....	5-2-I. أهمية مخلفات نبات الرمان
15.....	6-2-I. الدراسات العلمية المنجزة حول قشور الرمان
15.....	7-2-I. المكانة الاقتصادية لنبات الرمان

15	3-I. ظاهرة الامتزاز.....
15	1-3-I. تعريف ظاهرة الامتزاز.....
16	2-3-I. آلية الامتزاز.....
16	3-3-I. العوامل المؤثرة على كفاءة الامتزاز.....
17	4-3-I. نماذج إيزوتارم الامتزاز.....
17	1-4-3-I. نموذج لانغموير (Langmuir isotherm).....
18	2-4-3-I. نموذج فروندليش (Freundlich isotherm).....
19	4-I. الأصباغ (الملونات).....
19	1-4-I. تعريف.....
19	2-4-I. صبغة أزرق الميثيلين.....
20	المراجع.....

الفصل الثاني

25	1-II. المواد والأجهزة المستعملة.....
26	2-II. تحضير العينة (المادة الأولية).....
26	3-II. تحضير الكربون النشط.....
28	4-II. تحضير المحاليل.....
28	5-II. دراسة العوامل المؤثرة على الامتزاز.....
29	6-II. نمذجة إيزوتارم الامتزاز.....
30	7-II. توصيف الكربون النشط المحضر.....
31	المراجع.....

الفصل الثالث

33	1-III. مردود الكربون النشط المحضر.....
33	2-III. منحنى المعايرة لصبغة أزرق الميثيلين.....
34	3-III. نتائج دراسة العوامل المؤثرة على الامتزاز.....
38	4-III. نتائج إيزوتارم الامتزاز.....
44	5-III. دراسة تأثير الـ pH ودرجة الحرارة.....

45.....	III-6. الخصائص الوظيفية والمورفولوجية للكربون النشط
55.....	المراجع
57.....	خلاصة عامة
I.....	الملاحق

المقدمة العامة

مقدمة عامة

يشهد العالم في العقود الأخيرة تزايداً ملحوظاً في مستويات تلوث المياه نتيجة التوسع الصناعي والنمو السكاني المتسارع مما أدى الى تعرض الموارد المائية لمختلف أنواع الملوثات. وتعد مياه الصرف الصحي من أبرز مصادر هذا التلوث لما تحتويه من مواد كيميائية سامة ومركبات عضوية ذات تأثيرات خطيرة على الانسان والحيوان [1].

إن الحفاظ على جودة المياه الآمنة ليس مجرد ضرورة بيئية بل هو ركيزة أساسية للتنمية المستدامة نظراً لتأثيرها المباشر على الجوانب الاقتصادية والاجتماعية وكذا الصحة العامة.

ومن بين الملوثات الأكثر انتشاراً، تبرز الملوثات الكيميائية خاصة الاصبغ الصناعية. إذ يصعب التخلص منها باستخدام الطرق التقليدية كما أنها تعيق نفاذ الضوء في المسطحات المائية مما يؤثر سلباً على عمليات التمثيل الضوئي ويُخل بالتوازن البيئي حتى إذا كانت الملوثات بتراكيز منخفضة فإن التراكم المستمر له تأثير كبير وضار فمثلاً يتميز أزرق الميثيلين بثباته الكيميائي وصعوبة تحلله.

وأمام هذه التحديات تم تطوير العديد من التقنيات لمعالجة مياه الصرف الصحي مثل: الترسيب التبادل الايوني، التخرثر الكيميائي [2] الاكسدة الضوئية والاكسدة المتقدمة [3]. رغم تعدد هذه الطرق إلا انها تعاني من بعض القيود مثل ارتفاع التكلفة استهلاك الطاقة وضعف الكفاءة في إزالة بعض الملوثات.

في هذا السياق برزت تقنية الامتزاز كواحدة من أكثر الطرق فعالية لبساطتها وكفاءتها العالية في إزالة الملوثات من المياه وكذا صداقتها للبيئة وهو ما يلبي الهدف الرئيسي للتنمية المستدامة [1].

يعد الكربون النشط من أكثر المواد استخداماً في عمليات الامتزاز لما يتميز بمساحة سطحية كبيرة وخصائص فيزيائية وكيميائية تجعله قادراً على إزالة طيف واسع من الملوثات من المحاليل المائية بما في ذلك من المعادن والاصباغ غير أن ارتفاع تكلفة الكربون النشط التجاري دفع الباحثين إلى البحث عن بدائل منخفضة التكلفة ومستدامة [3].

لذلك تعد النفايات الزراعية مصدر واعد لإنتاج مواد مازة ذات كفاءة عالية نظراً لتوفرها بكثرة واحتوائها على نسب مرتفعة من الكربون وقابليتها للتحلل البيولوجي وعلى وجه التحديد تدرس نفايات الفاكهة كمواد مازة طبيعية حاملة للأيونات مثل: قشور جوز الهند، نوى الخوخ، قشور البرتقال، قشور الرمان وغيرها [1].

في أواخر القرن الماضي برزت الكيمياء الخضراء كاتجاه حديث يحظى باهتمام كبير في البحث العلمي ومن ضمن توجهاتها حظيت النفايات الزراعية اهتماما متزايداً. يهدف عملنا هذا الى تثمين قشور الرمان لتحضير كربون نشط فعال وتقييم كفاءته في إزالة صبغة الميثيلين الأزرق من المحاليل المائية. وهذا الكربون المحضر يعتبر جيلاً جديداً من المواد المازة مما يحقق فوائد بيئية واقتصادية في آن واحد.

تحقيقاً لهذه الغاية سنتطرق في هذه المذكرة إلى:

الفصل الأول: عموميات ودراسات سابقة.

الفصل الثاني: الطرق والأجهزة.

الفصل الثالث: عرض النتائج ومناقشتها.

المراجع الاجنبية

- [1] Boutaleb Y., Zerdoum R., Bensid N., Abumousa R. A., Hattab Z., & Bououdina M. Adsorption of Cr (VI) by mesoporous pomegranate peel biowaste from synthetic wastewater under dynamic mode. *Water*.2022; 14(23): 3885.
- [2]Abbaz A., Arris, S., Viscusi G., Ayat A., Aissaoui H., & Boumezough Y. Adsorption of Safranin O Dye by Alginate/Pomegranate Peels Beads: Kinetic, Isotherm and Thermodynamic Studies. *Gels*. 2023 ; 9(11) : 916.
- [3]Al-Onazi W. A., Ali M. H., & Al-Garni T. Using pomegranate peel and date pit activated carbon for the removal of cadmium and lead ions from aqueous solution. *Journal of Chemistry*. 2021; 2021(1): 5514118.

الفصل الأول

عموميات ودراسات سابقة

1-I. عموميات حول الكربون النشط

1-1-I. تمهيد

يرجع استخدام الكربون النشط إلى العصور القديمة، حيث استُخدم من طرف قدماء المصريين حوالي سنة 1550 ق.م في تنقية المياه، كما استُعمل لاحقاً في المجال الطبي أثناء العمليات الجراحية. وفي حدود سنة 1100 م، تم استخدامه كبديل للفحم الحيواني في تكرير السكر. وخلال الحرب العالمية الأولى، استُخدم الكربون النشط في صناعة الأقنعة الواقية للحماية من الغازات السامة. ومنذ ذلك الحين، تزايدت تطبيقاته بشكل كبير، ولا يزال يُستخدم إلى يومنا هذا في العديد من المجالات البيئية والصناعية [1].

2-1-I. تعريف الكربون النشط

يُعرّف الكربون النشط، وفقاً للمجلس الأوروبي لاتحادات الصناعات الكيماوية (CEFIC)، بأنه مادة كربونية سوداء ذات بنية مسامية عالية، تتميز بمساحة سطحية داخلية كبيرة جداً. وهو مادة غير قابلة للذوبان في الماء، عديمة الطعم والرائحة، وقادرة على امتزاز مجموعة واسعة من المواد على سطحها الداخلي، وتُعرف هذه المواد بـ "المواد الممتزة" [2].



الشكل (1-I): صورة الكربون النشط

3-1-I. تركيب وبنية الكربون النشط

• التركيب الكيميائي

يتكون الكربون النشط أساساً من عنصر الكربون، إضافة إلى كميات صغيرة من الهيدروجين، الأكسجين، النيتروجين، والكبريت. وتؤثر هذه العناصر الثانوية بشكل كبير على الخصائص السطحية والتفاعلية للمادة.

• البنية البلورية

يتكون الكربون النشط من بنية مجهرية شبه بلورية تتألف من وحدات بنيوية دقيقة قريبة في تركيبها من بنية الجرافيت. حيث تتكون هذه البنية من طبقات مستوية من ذرات الكربون مرتبة في شكل حلقات عطرية إلا أنها غير منتظمة الترتيب.

تتراوح أبعاد البلورات الدقيقة في الكربون النشط بين 5 أنغستروم و150 أنغستروم، وتفصل بينها مسافات تقارب 3.6 أنغستروم، مما يؤدي إلى تكوين بنية غير متجانسة وغنية بالفراغات [3].

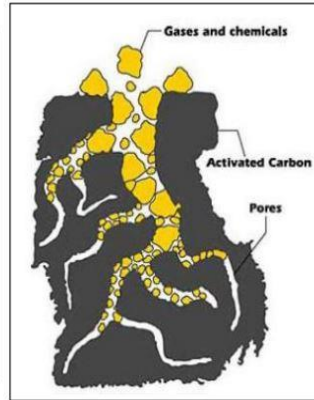
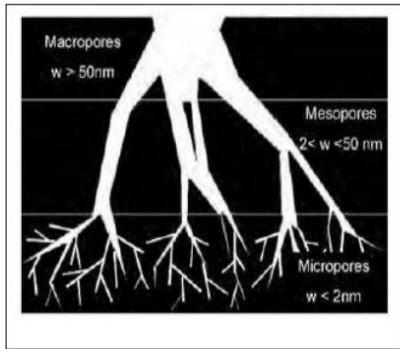
• البنية المسامية

تمثل المسامية الجزء الفراغي داخل الكربون النشط، ويمكن أن تصل إلى 80% من حجمه. تُصنّف المسامات عمومًا وفقًا لحجومها إلى ثلاث فئات.

تُحدّد المسامية باستخدام جهاز يسمى مقياس المسامية (Porosimeter).

الجدول (I - 1): تصنيف المسامات للكربون النشط [4]

نوع المسامات	القطر (نانومتر)
المسامات الدقيقة (Micropores)	أقل من 2
المسامات المتوسطة (Mesopores)	بين 2 و50
المسامات الكبيرة (Macropores)	أكبر من 50

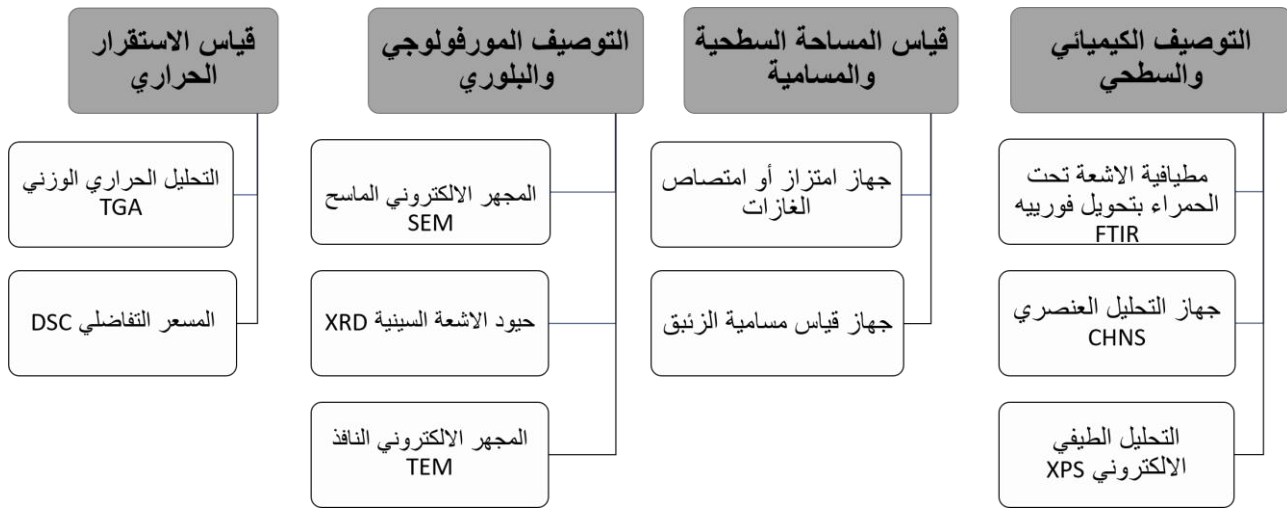


الشكل (I - 2): يوضح بنية المسامات في الكربون النشط

• المساحة السطحية النوعية

تُعرّف بأنها المساحة التي يشغلها الكربون النشط لكل وحدة كتلة، وتأخذ في الاعتبار كل التجاويف الموجودة على المستوى الجزيئي. يمكن أن تصل إلى 3000 م²/غ. وتزداد هذه المساحة بزيادة درجة المسامية مما يعزز من كفاءة الامتزاز [5].

• أجهزة توصيف الكربون النشط



مخطط (I-1): يوضح بعض أجهزة توصيف الكربون النشط

4-1-I. خصائص الكربون النشط

• الخصائص الفيزيائية

- ✓ قياس أبعاد الحبيبات: نظرًا لاحتواء العينة الواحدة من الكربون النشط على حبيبات مختلفة الأبعاد فإن هذه الأبعاد تؤثر على شدة الامتزاز من بين الطرق المستعملة لتحديد أبعاد الحبيبات: الغرلة طريقة الموصلات والطريقة الميكروسكوبية [5].
- ✓ التفتت: يُقال عن الكربون النشط إنه يملك خاصية التفتت إذا ترك آثارًا على الأصابع.
- ✓ الرطوبة والرماد: للحصول على جودة عالية، يفضل أن تكون نسبة الرطوبة أقل من 5% ونسبة الرماد لا تتجاوز 10% [6].
- ✓ معامل الوحدة: عامل يحدد مدى انتظام حجم الحبيبات، ويُحسب من خلال النسبة بين أقطار الحبيبات عند مستويات توزيع معينة (10% و 60%) [7].

• الخصائص الكيميائية

- تتعتمد الخصائص الكيميائية على قدرة الكربون النشط على امتزاز المواد المختلفة، في بعض الدول الأوروبية وخاصة فرنسا، تُستخدم الدلالات التالية للتعبير عن خمسة مواد ملوثة هي: الفينول (F)، اليود (I)، الفينازون (A)، المنظفات (D)، وإندول (N) وتحدد غالبًا بدلالة FND.
- ✓ دلالة الفينول (phenol index): تُستخدم لتقدير فعالية الكربون النشط في معالجة ملوثات الذوق والروائح.
- ✓ دلالة اليود (Iodine): تُستخدم لتحديد فعالية الكربون النشط في تنقية المركبات ذات الكتلة الجزيئية الصغيرة [5].

I-1-5. طرق تحضير الكربون النشط

يمكن تحضير الكربون النشط انطلاقاً من مواد أولية غنية بالكربون مثل: الخشب، قشور جوز الهند، قشور الفواكه (مثل: الرمان) ومخلفات زراعية أخرى. تمر عملية التحضير بمرحلتين رئيسيتين:

• الكربنة

تتضمن هذه الخطوة الانحلال الحراري للمادة الأولية غير المميّهة في وسط قليل التأكسد، عند درجة حرارة تتراوح بين 200°م و600°م. تؤدي هذه العملية إلى إزالة المركبات غير المرغوبة، مما ينتج عنه مادة غنية بالكربون ذات بنية أولية مسامية ومساحة سطحية محدودة.

• التنشيط

تهدف هذه المرحلة إلى تطوير البنية المسامية وزيادة المساحة السطحية، وتنقسم إلى:

✓ التنشيط الفيزيائي

يعتمد على الأكسدة في درجات حرارة مرتفعة (750-1000)°م بوجود أكاسيد غازية، مثل الهواء بخار الماء وثاني أكسيد الكربون (غالبًا كمزيج). حيث تلعب درجة الحرارة دورًا مهمًا في تحسين توزيع المسامات.

✓ التنشيط الكيميائي

يتم باستخدام مواد كيميائية مثل: حمض الفوسفوريك (H_3PO_4)، هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) وكلوريد الزنك ($ZnCl_2$).

تُعالج المادة الأولية بهذه المواد قبل التسخين، ثم تُسخن عند درجات حرارة أقل مقارنة بالتنشيط الفيزيائي وبعد ذلك تُغسل جيدًا بالماء المقطر لإزالة بقايا المواد الكيميائية.

تساهم هذه الطريقة في الحصول على بنية مسامية متطورة وكفاءة امتزاز عالية [5].

I-1-6. تطبيقات الكربون النشط

• معالجة المياه

- يستخدم الكربون النشط في ترشيح وتنقية مياه الشرب (كما في شمعات فلاتر التنقية) ومعالجة مياه الصرف الصحي [4].

- تم استعمال كربون نشط محضر من بذور الجوافة في امتزاز أزرق الميثيلين من المحاليل المائية [5].

- امتزاز الأصباغ والملوثات العضوية الذائبة في مياه الصرف الصحي [8].

- امتزاز الرصاص والكروم بواسطة كربون نشط حبيبي محضر من قشور جوز الهند [9].

- إزالة المركبات العضوية والمركبات المتطايرة من مياه الشرب [10].

• التطبيقات الصناعية والطبية

- مقاومة بعض أنواع البكتيريا [4].
- صناعة الأغذية والصناعة الصيدلانية [5].
- امتزاز الروائح من الجروح والتقرحات [11].
- يستخدم في علاج سرطان المعدة [12].

2-I. الدراسة الايتنوصيدلانية لنبات الرمان

1-2-I. الوصف المورفولوجي لنبات الرمان

تعتبر العائلة الرمانية (Punicaceae) واحدة من العائلات النباتية المميزة تضم أشجارا وشجيرات وتتبع لرتبة الآسيات. أشهر أنواعها شجرة الرمان.

تُعدّ أشجار الرمان من الأشجار المعمّرة التي تُثمر في فصل الخريف، ويتراوح ارتفاعها بين 2 و6 أمتار تتميز بأغصانها المتفرعة وأوراقها اللامعة، إضافةً إلى أزهارها الجميلة التي تتحول لاحقاً إلى ثمار، تنمو أفرعها بقوة وتتخذ شكلاً أسطوانياً [13، 14].



الشكل (I - 3): صورة شجرة الرمان

• الأوراق

أوراق الرمان رمحية، ضيقة ومتطاولة، لامعة من السطح العلوي، ملساء ومتقابلة على الأفرع. يتراوح طولها بين (3-7) سم وعرضها حوالي 2 سم [15].



الشكل (I - 4): صورة أوراق شجرة الرمان

• الأزهار

تُعرف أزهار الرمان باسم "جلنار"، وهي كلمة معرّبة من الفارسية وتعني "ورد الرمان"، يتراوح لونها بين الأحمر والبرتقالي، وتأخذ شكلاً قمعياً، وتنقسم إلى نوعين: أزهار عقيمة (مذكرة) وأخرى خنثى (كاملة) [16، 17].



الشكل (I - 5): صورة أزهار شجرة الرمان

• الثمار

ثمار الرمان (الرمانة) كروية، كبيرة الحجم، لونها أحمر أو أصفر أو أخضر مائل للبياض، وأحياناً بنفسجي غامق، ويختلف اللون حسب الأصناف، قمة الثمرة تحمل الكأس والسبالات الجافة، وتحتوي على الأسدية والمتوك، يبلغ قطر الثمرة (5-8) سم، ووزنها (200-800) غ، ويصل عدد البذور داخلها إلى 1200 بذرة [18].



الشكل (I - 6): صورة ثمار الرمان

• القشور

سميكة وجلدية، يتراوح سمكها ما بين (2 - 3) ملم، وألوانها تتدرج من الأصفر المخضر إلى الأحمر القرمزي [18، 19].



الشكل (I-7): صورة قشور ثمار الرمان

• البذور

البذور مضلعة الشكل، وتُغطى بطبقة جيلاتينية تحتوي على العصير الذي يتفاوت لونه من الأبيض المصفر إلى القرمزي الداكن، يصل عدد البذور إلى 1200 بذرة، وهذا الجزء هو الصالح للأكل [18]، [20].



الشكل (I-8): صورة بذور الرمان

I-2-2. التصنيف العلمي لنبات الرمان

صُنّف نبات الرمان (*Punica granatum L.*) سنة 1753 م على يد العالم (Linné)، كما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول (I - 2): التصنيف النظامي لنبات الرمان

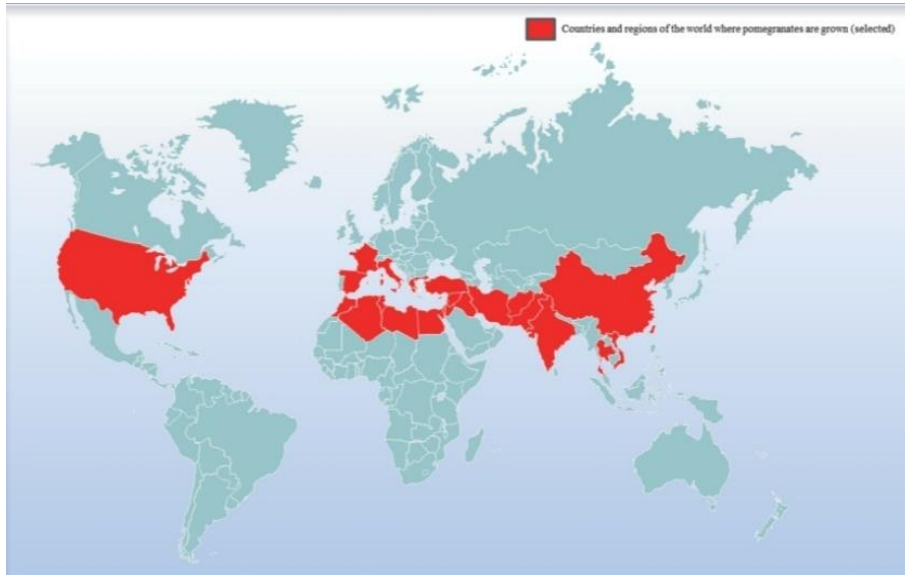
المملكة	النباتية	Plantae	Régne
شعبة	النباتات البذورية	Spermaphytes	Embranche
تحت الشعبة	كاسيات البذور	Angiospermes	Sous-embranche
صنف	ثنائيات الفلقة	Magnoliopsida	Classe
رتبة	الاسية	Myrtales	Ordre
العائلة	الرمانية	Punicaceae	Famille
جنس	الرمان	Punica	Genre
نوع	الرمان المثمر	<i>Punica granatum L.</i>	Espèce

I-2-3. التوزيع الجغرافي لنبات الرمان

الموطن الأصلي: يعود أصل الرمان إلى آسيا الغربية (إيران والهند).

عالمياً: يزدهر في المناطق شبه المدارية (بين خطي عرض 41 شمالاً وجنوباً)، وينمو في المناطق الساحلية الدافئة وصولاً إلى المرتفعات التي تبلغ 2300 م فوق سطح البحر. ويُزرع في مناطق متعددة مثل: حوض البحر الأبيض المتوسط، إسبانيا، إيطاليا، والولايات المتحدة الأمريكية [21].

محلياً: تنتشر زراعة الرمان في الجزائر على نطاق واسع شمال -جنوب وشرق-غرب، خاصة في المناطق الداخلية والهضاب العليا ذات المناخ شبه الجاف. وتُعد ولاية الجلفة من أبرز مناطق إنتاج الرمان في الجزائر، إلى جانب ولاية تلمسان، خاصة بمنطقة سهل الرامشة المعروفة بجودة إنتاجها.



الشكل (I-9): خريطة التوزيع الجغرافي العالمي لنبات الرمان [22]

I-2-4. الاستعمالات التقليدية لنبات الرمان

استخدم الرمان تاريخياً في علاج العديد من الحالات:

- عند الفراعنة: استُخدمت قشور الرمان المحروقة مع العسل لإزالة آثار الجدري.
- الطب الصيني: علاج تصلب الشرايين، السكري، ارتفاع ضغط الدم وأمراض الفم.
- الجهاز الهضمي: علاج القرحة، الإسهال والقضاء على الديدان الشريطية [15].

I-2-5. أهمية مخلفات نبات الرمان

- أظهرت خلاصة الاغشية الفاصلة نشاطاً معتدلاً في تثبيط نمو خلايا سرطان القولون [23].
- تستعمل في الصناعات الغذائية كمصدر للمركبات النشطة بيولوجياً [23].
- تستخدم في معالجة المياه وإزالة المعادن الثقيلة [24].
- تصنيع الجسيمات النانوية (كالذهب والفضة) [25].

I-2-6. الدراسات العلمية المنجزة حول قشور الرمان

- مستخلصات القشور فعالة ضد بكتيريا المكورات العنقودية والإشريكية القولونية (E. coli) [26].
- تستخدم كمضافات وظيفية (طبيعية) في منتجات المخابز والمشروبات واللحوم واللبان [27].
- الحصول على مضادات للأكسدة والالتهابات والسرطان من مركبات قشور الرمان [28].
- إزالة أيونات الزئبق والكاديوم من المياه الملوثة باستخدام قشور الرمان المطحونة [29].

I-2-7. المكانة الاقتصادية لنبات الرمان

يشهد إنتاج الرمان عالمياً تزايداً مستمراً، حيث يتجاوز الإنتاج 2.5 مليون طن سنوياً. وتُعد الهند من أكبر الدول المنتجة، تليها إيران والصين وتركيا. كما تُمثل القشور نسبة تقارب 30% من وزن الثمرة، مما يجعلها مورداً مهماً للاستغلال الصناعي [30].

I-3. ظاهرة الامتزاز

I-3-1. تعريف ظاهرة الامتزاز

الامتزاز هو ظاهرة فيزيائية وكيميائية تحدث عند تلامس طور سائل أو غازي مع سطح مادة صلبة. وتتمثل في جذب وتراكم جزيئات المادة (الممتز) على السطح البيني للمادة الصلبة (المزاز) بفعل قوى جذب تمارسها ذرات السطح. يُصنف الامتزاز حسب حالة المادة الممتزة إلى امتزاز (غاز-صلب) أو (سائل-صلب).

تعد هذه التقنية من الطرق المفضلة في معالجة التلوث المائي نظراً لكفاءتها العالية، سهولة تشغيلها وتكلفتها المنخفضة مقارنة بالطرائق الأخرى [4، 5].

• الفرق بين الامتزاز والامتصاص

يختلف الامتزاز عن الامتصاص؛ فالامتزاز هو تجمع المادة على أسطح حبيبات المادة المازة (Reynolds & Richards, 1996)، بينما الامتصاص هو انتشار وتغلغل المادة في السائل أو الصلب بشكل محلول حقيقي. الظاهرة العكسية للامتزاز هي الانخلاع (Desorption).

الجدول (I - 3): مقارنة بين الامتزاز والامتصاص

الامتصاص	الامتزاز
ظاهرة حجمية	ظاهرة سطحية
عملية ماصة للحرارة	عملية طاردة للحرارة
لا يتأثر بدرجة الحرارة	يتأثر في درجات الحرارة المنخفضة

I-3-2. آلية الامتزاز

يُصنف الامتزاز بالاعتماد على نوع وطبيعة القوى التي تربط جزيئات أو ذرات المادة الممتزة بالسطح الصلب [31]، سواء كانت هذه القوى روابط ضعيفة (مثل قوى فان دير فالس) أو قوية (مثل الروابط الكيميائية)، بالإضافة إلى طبيعة النشاط الإلكتروني للسطح. وبناءً على ذلك، يمكن تصنيف الامتزاز إلى نوعين [32]:

• الامتزاز الفيزيائي (Physisorption)

- يُعرف أيضًا بالامتزاز الطبيعي أو امتزاز فان دير فالس [33].
- ينشأ عن قوى تجاذب طبيعية تحدث بين السطح الماز (الذي يكون خاملاً بسبب التشبع الإلكتروني لذراته) والجزيئات الممتزة [34].

• الامتزاز الكيميائي (Chemisorption)

- يحدث على السطوح النشطة غير المشبعة إلكترونياً.
- ينشأ عن قوى ربط كيميائي أكبر من قوى فان دير فالس، وقد تكون روابط تساهمية أو أيونية [35].

I-3-3. العوامل المؤثرة على كفاءة الامتزاز

تتأثر قدرة المادة المازة بعدة عوامل فيزيائية وكيميائية:

- الرقم الهيدروجيني (pH): يؤثر على درجة تأين الجزيئات وشحنة سطح المادة المازة. تزداد الكفاءة عندما يكتسب السطح شحنة مخالفة لشحنة الجسيمات الممتزة [36، 37].
- درجة الحرارة (T): هناك حالتين
الامتزاز الطارد للحرارة: تقل كمية الامتزاز بزيادة الحرارة نتيجة زيادة الطاقة الحركية للجزيئات.
الامتزاز الماص للحرارة: تزداد الكمية بزيادة الحرارة، وغالباً ما يكون هذا النوع كيميائياً [38، 39].
- زمن التلامس: يُعد زمن التلامس بين السطح الصلب للمادة المازة ومحلول الامتزاز من أهم المتغيرات في التطبيقات العملية. كلما زاد الزمن كانت عملية الامتزاز أكثر اكتمالاً، حيث تؤدي زيادة زمن التلامس إلى تقليل مقاومة الطبقة الحدية، مما يعزز معدل الامتزاز ويحسن حركة جزيئات المادة الممتزة أثناء العملية [4، 40].
- تركيز الملوث: بشكل عام تزداد كمية المادة الممتزة من المحلول بزيادة تركيزها، في بعض الحالات تتوقف عملية الامتزاز عندما تتشكل طبقة واحدة من المادة الممتزة على السطح، إلا أنه قد يستمر في حالات أخرى يكون عدد طبقات من المادة الممتزة على سطح المادة المازة ومن ثم تكون كمية المادة الممتزة أكبر من الامتزاز أحادي الطبقة.

- جرة المادة المازة: تعد كمية المادة المازة من العوامل المهمة، إذ تُستخدم لتحديد سعة امتزاز المادة لأي مادة ممتزة عند تركيز ابتدائي معلوم. إن زيادة كمية المادة المازة تؤدي إلى زيادة عدد المواقع الفعالة المتاحة، مما يرفع النسبة المئوية للإزالة، لكنه قد يؤدي لنقصان سعة الامتزاز لكل وحدة كتلة (ملغ/غ) [4].

علما أن:

نسبة الإزالة: (% إزالة) تعبر عن مدى قدرة الكربون النشط على حذف الصبغة من المحلول. تحسب بالعلاقة:

$$\% \text{الإزالة} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

حيث:

- C_0 : التركيز الابتدائي للملوث قبل الامتزاز.
- C_e : التركيز المتبقي بعد الامتزاز.
- سعة الامتزاز: كمية الملوث التي امتزها 1 غرام من الكربون النشط. ووحدتها غالبًا: ملغ/غ. تحسب بالعلاقة:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

حيث:

- C_0 : التركيز الابتدائي.
- C_e : التركيز بعد الامتزاز.
- V : حجم المحلول.
- m : كتلة الكربون النشط.

4-3-I. نماذج إيزوتارم الامتزاز

1-4-3-I. نموذج لانغموير (Langmuir isotherm)

- في عام 1916، وضع إيرفينغ لانغموير نموذجًا يعد الأكثر استخدامًا لقياس كميات المادة الممتزة والمازة. يعتمد هذا النموذج على افتراضات أساسية هي:
- تشكل طبقة أحادية الجزيء فقط على سطح المادة الصلبة.
 - عدم وجود تفاعلات بين الجزيئات الممتزة.
 - طاقة امتزاز متساوية لجميع المواقع [41].
- فحسب هذا النموذج، تكون عملية الامتزاز سريعة في البداية ثم تصل إلى حالة اتزان بعد تساوي معدل سرعة ارتباط الجزيئات بالسطح ومعدل عودتها إلى المحلول [4].

إن الشكل الخطي لهذه المعادلة يمكن أن يعبر عنه كما يلي:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max}} + \frac{1}{K_L Q_{\max}} \left[\frac{1}{C_e} \right]$$

وبإعادة ترتيب هذه المعادلة نحصل على الشكل الآتي:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L Q_{\max}} + \frac{C_e}{Q_{\max}}$$

حيث:

- K_L : ثابت ايزوتارم لانغموير والذي يشير إلى قوة ارتباط الممتز على السطح الماز.
- Q_{\max} : السعة القصوى لامتزاز المادة المازة.
- C_e : تركيز المادة الممتزة عند التوازن في المحلول وحدته ملغ/ل أو جزء في المليون.
- q_e : كمية المادة الممتزة عند التوازن لكل 1 غ من الماز وحدتها ملغ/غ.

يمكن حساب قيم Q_{\max} و K_L من رسم العلاقة الخطية بين C_e/q_e بدلالة C_e [4].

يتميز هذا النموذج بعامل اتزان R_L .

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e}$$

فإذا كانت:

- $R_L < 1$ شروط الامتزاز جيدة.
- $R_L > 1$ عملية غير مفضلة.
- $R_L = 0$ امتزاز غير عكوس.
- $R_L = 1$ امتزاز خطي [42].

I-3-4-2. نموذج فروندليش (Freundlich isotherm)

تُعد معادلة فروندليش من أكثر النماذج شيوعاً لوصف عمليات الامتزاز غير المثالية والعكسية. يشير إلى سطح غير متجانس، هذا النموذج قليل النجاعة بالنسبة للتراكيز الكبيرة، لكن يمثل الامتزاز جيداً في المحاليل المخففة [5].

يمكن التعبير عن نموذج معادلة فروندليش بصيغ غير خطية وخطية كما هو موضح في المعادلة:

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e)$$

حيث:

- K_F : ثابت فروندليش.
- C_e و q_e كما معرفتان سابقاً.

4-I. الأصباغ (الملونات)

1-4-I. تعريف

وهي مركبات كيميائية تُستخدم لإكساب المواد ألواناً ثابتة، وقد تكون سامة أو مسرطنة في بعض الحالات.

تحتوي جزيئات الأصباغ على:

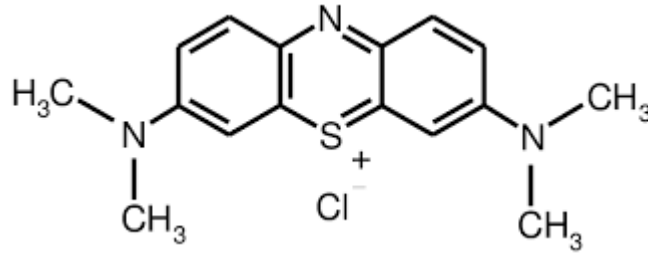
• مجموعة الكروموفور: المسؤولة عن اللون.

• مجموعة الأوكسوكروم: التي تعزز شدة اللون وتثيبته.

وتنقسم الأصباغ إلى طبيعية وصناعية، وقد حلت الأصباغ الصناعية محل الطبيعية منذ منتصف القرن التاسع عشر.

2-4-I. صبغة أزرق الميثيلين

في هذه الدراسة، تم استخدام صبغة أزرق الميثيلين كمُلَوِّث نموذجي، وهي صبغة كاتيونية ذات الصيغة الكيميائية: $(C_{16}H_{18}ClN_3S)^+$.



الشكل (10-I): الصيغة الكيميائية لصبغة أزرق الميثيلين

قد يؤدي التعرض المستمر لها إلى آثار صحية مثل تهيج العين، الغثيان وصعوبة التنفس؛ مما يجعل معالجتها أمراً ضرورياً [43، 44].



الشكل (11-I): صورة لصبغة أزرق الميثيلين

المراجع العربية

- [1] الحايك ن. مدخل إلى كيمياء السطوح. قسنطينة، دار البعث؛ 1990.
- [4] الطائي سي، إبراهيم خ. تحضير أنواع جديدة من الكربون المنشط واختبار كفاءتها من خلال امتزاز بعض الأصباغ عليها، دراسة ثيرموديناميكية وحركية. أطروحة دكتوراه. كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، العراق؛ 2017.
- [5] كمرشو ع. استعمال كربون نشط محضر من مشتقات النخيل التمر (نواة ثمرة دقلة نور) في معالجة المياه المستعملة الحضرية دراسة مقارنة. أطروحة دكتوراه. كيمياء تحليلية ومراقبة محيط، قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر؛ 2015.
- [13] الحسيني أ. الساحران نخل والمان، القاهرة - ط1 مكتبة ابن سينا؛ 2014.
- [14] عمي الدجوي، موسوعة زراعة وانتاج نباتات الطبية (الكتاب الثاني 1997)؛ 2023.
- [15] زيدان م. دراسة الفعالية المضادة للأكسدة والبكتيريا لمستخلصات الرمان (*Punica granatum L.*) أطروحة دكتوراه. كلية الرياضيات وعلوم المادة، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر؛ 2018.
- [16] جهان بنت سعود بن راشد البراهيم، تأثير عصير الرمان ضد البكتيريا المسببة لالتهابات الجروح -قسم النبات - الأقسام العلمية كلية التربية. المملكة العربية السعودية؛ 2008.
- [18] م. طه الشيخ حسن، النخيل-التين-الكاكي-الرمان، الفاكهة والأشجار المثمرة، الزراعة، ص133-135؛ 2015.
- [19] عبد الرسول زين الدين. الرمان. قسم آداب وأخلاق الإسلامية؛ 10 يوليو 2023.
- [21] فرجيني ف، مدلين ر، أحمد ص، الرمان - معهد بحوث البساتين- مركز البحوث الزراعية؛ 2014.
- [37] ناصر و، سعيد م. من مذكرة الدراسة الحركية والترموديناميكية لامتزاز الأيونات من محاليلها المائية على سطح فوسفات التيتانيوم. قسم الكيمياء، جامعة كربلاء العراق؛ 2006.

المراجع الأجنبية

- [2] ZIATIM. Adsorption et électrosorption de l'arsenic (III) sur charbon à base de noyaux de dattes actives thermiquement et chimiquement. Thèse doctorat. Université Badjimokhtar-Annaba, Algérie ; 2012.
- [3] Mme BOUGHAITA I. Essais de dépollution des eaux contaminées par un composé organique par l'utilisation de nouveaux biosorbants. Thèse Doctorat. Université 20 Août 1955-Skikda, Algérie; 2018.

- [6] Claude Cardut. Génie de l'environnement, les traitement de l'eau, procédés physico – chimiques et biologiques, cours et problèmes. Edition Euipses; 2005.
- [7] Dubois V., AbriakN. E., Zentar R., & Ballivy G. The use of marine sediments asa pavement base material. Waste Management.2009 ; 29(2) : 774-782.
- [8] Safarik I., Nymburska K. and Safarikova M. Adsorption of water soluble organicdyes on magnetic charcoal. Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology. 1997; 69:1-4.
- [9] Jaber L., et al. Adsorptive Removal of Lead and Chromate Ions from Water by Using Iron-Doped Granular Activated Carbon Obtained from Coconut Shells.2022;14(17):10877.
- [10] Yuan J., Passeport E., & Hofmann R. Understanding adsorption and biodegradation in granular activated carbon for drinking water treatment: A critical review. Water research.2022;210:118026.
- [11] Shreve R.N., Brink J. A. and Jr B. «Chemical Process Industries» .4York; 1976,163-166.
- [12] OhyamaT., Yamasaki J. and Lmanishi T. « School medicine, Kyoto, Prefect Univ., Japan » Gan to Kagaku Ryoho;1995,1632-1634.
- [17] Ed Stover and Eric Mercure W. The pomegranate: a new look at the fruit of paradise. HortScience. 2007 ;42(5) :1088-1092.
- [20] HMID I., contribution à la valorisation alimentaire de la grenade marocaine (*Punicagranatum L.*) : caractérisation physicochimique biochimique et stabilité de leur jus frais. Thèse de doctorat. Université d'Angers, French ; 2014.
- [22] LIU, Chen, WANG, Nan, ZHANG, Ying-Yuan, et al. Pomegranate: historical origins, nutritional composition, health functions and processing development research. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2025; 65(33): 8447-8469.
- [23] Abdelsalam R. R., Elshrif S. A., & Abdel-Daem A. K. Pomegranate septum ultrasonic extraction and utilization of its functional benefits against HCT-116 cells and Manufacture Gluten-Free Pancake. 2025.
- [24] Lateef A., Fajingbesi A. O., Azeez M. A., & Hamed Z. O. Repurposing pomegranate fruit wastes for nanobiotechnological applications in emerging circular bioeconomy. Notulae Scientia Biologicae. 2025;17(3):12683-12683.
- [25] Monika P., Chandraprabha M. N., Hari Krishna R., Vittal, M., Likhitha C., Pooja N., Chaudhary, V., & C, M. Recent advances in pomegranate peel extract mediated

nanoparticles for clinical and biomedical applications. *Biotechnology & genetic engineering reviews*. 2024; 40(4),3379-3407.

[26] Abutayeh R. F., Ayyash M. A., Alwany R. A., Abuodeh A., Jaber K., & Al-Najjar M. A. Exploring the antimicrobial potential of pomegranate peel extracts (PPEs): Extraction techniques and bacterial susceptibility. *PloS one*, 2024;19(12): e0315173.

[27] Gulzhan K. Food applications of pomegranate peel bioactive compounds. In *Sustainable Applications of Pomegranate Peels*. Academic Press. 2025,55-78.

[28] Andishmand H., Masoumi B., Yousefi M., Sadeghizadeh-Yazdi, J., Rostami, M., Ezzati Nazhad Dolatabadi, J., & Jafari, S. M. Pharmacodynamics, pharmacokinetics, and cell signaling pathways of pomegranate peel extract. *Phytochemistry Reviews*. 2025; 1-24.

[29] Suleiman M. A., Zaini M. A. A., & Mu'azu N. D. Pomegranate peel adsorbents for water pollutants removal: preparation, characterization and applications. *International Journal of Phytoremediation*. 2025; 27(8):1119-1139.

[30] Abbaz A., Arris, S., Viscusi G., Ayat A., Aissaoui H., & Boumezough Y. Adsorption of Safranin O Dye by Alginate/Pomegranate Peels Beads: Kinetic, Isotherm and Thermodynamic Studies. *Gels*.2023 ; 9(11) : 916.

[31] Terchi S. Adsorption du Bore en solution aqueuse essai de dépollution. Mémoire de magister. Université Mentouri Constantine, Département de chimie, 2009.

[32] Guergazi S. Amimeur D., Achour S. Élimination des Substances humiques de deux eaux de surface algériennes par adsorption sur charbon actif et sur bentonite. *Larhyss Journal*. Mars 2013 ;10(2) : 125-137.

[33] Mechrafi E. Adsorption désorption et mobilité des herbicides au Contact des adsorbants organiques et minéraux. Thèse de doctorat. Université Mohammed V, Rabat, Maroc; 2002.

[34] Atkins P.W. *Physical chemistry*. 5Th Edition. Oxford: Oxford University press; 1994,25-30.

[35] Khan S.U. *Fundamental aspects of pollution control and environmental science*, Elsevier. New York; 1980.

[36] Belhaj A. F., ElraiesK. A., Mahmood S. M., Zulkifli N. N., Akbari S., and Hussien O. S. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10(1): 125-137.

- [38] Edeline F. L'Épuration Physico-chimique, Théorie et Technologie des Eaux, Ed. CE E OC sprl, Liège.
- [39] Kefala M. I., Zouboulis A. I., and Matis K. A. Biosorption of cadmium ions by actinomycetes and separation flotation. *Environmental Pollution*. 1999; 104(2): 283-293.
- [40] Joachim KrouN., Etude expérimentale et modélisation d'un procédé séquentiel AD-OX d'élimination de polluants organiques. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France ; 2010.
- [41] ArrisS. Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sur des sous-produits de céréales. Thèse du doctorat. Université de Constantine, Algérie ; 2008.
- [42] Rouesac F., Rouesac A. Analyse chimique, méthode et technique instrumentales modernes. Édition Dunod. Paris, France ; 2000.
- [43] DEHMANI S. Culture des microorganismes dans les eaux usées. Thèse en vue de l'obtention d'un diplôme de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie ; 2018.
- [44] Hammami S. Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés D'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de Doctorat. L'Université Paris-Est Institut Francilien des Sciences Appliquées et Tunis El Manar, le 12 Décembre 2008.

الفصل الثاني

الطرق والأجهزة

نستعرض في هذا الفصل البروتوكول التجريبي المتبع، بما يشمل طرق تحضير العينات، والأجهزة المستخدمة في التحليل، بالإضافة إلى الشروط التجريبية المعتمدة لتتبع فعالية الكربون النشط المحضر.

لقد تم اجراء العمل التجريبي في المخابر التالية:

المخبر البيداغوجي لقسم الكيمياء كلية الرياضيات وعلوم المادة.

مخبر الأرضية التقنية للتحاليل الفيزيائية والكيميائية –ورقلة -.

مخبر ترقية وتثمين الموارد الصحراوية بجامعة قاصدي مرباح – ورقلة -.

1-II. المواد والأجهزة المستعملة

الجدول (I - II): يوضح المواد والاجهزة المستعملة في العمل التجريبي

الأجهزة	المواد
<ul style="list-style-type: none"> • مطحنة كهربائية ومناخل • ميزان تحليلي • فرن تجفيف • فرن أنبوبي أفقي • جهاز رج وتسخين • جهاز الاشعة تحت الحمراء • جهاز الاشعة فوق البنفسجية-المرئية • جهاز المجهر الالكتروني الماسح 	<ul style="list-style-type: none"> • قشور ثمار الرمان • حمض الفوسفوريك H_3PO_4 • صبغة أزرق الميثيلين

II-2. تحضير العينة (المادة الأولية)

تم الحصول على قشور الرمان المستخدمة في هذا العمل من ثمار الرمان التي تم شراؤها من السوق المحلية. ولقد نُظفت الثمار جيدًا باستخدام ماء الصنبور ثم الماء المقطر لإزالة الشوائب والمواد غير المرغوب فيها، قبل فصل القشور عن البذور. بعد ذلك، خضعت القشور لعملية تجفيف بعيدًا عن أشعة الشمس المباشرة لعدة أسابيع حتى جفّت تمامًا، ثم طُحنت باستعمال مطحنة كهربائية للحصول على مسحوق ناعم، وبعدها نُخِل للحصول على حجم حبيبات أقل من 500 ميكرومتر، تم تخزين المسحوق داخل علب زجاجية محكمة الإغلاق في ظروف مظلمة وعند درجة حرارة الغرفة إلى حين استعماله [1، 2].

II-3. تحضير الكربون النشط

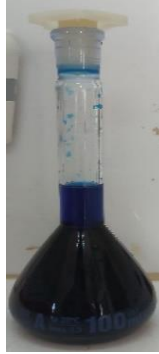
في البداية قمنا بخلط مسحوق قشور الرمان مع محلول حمض الفوسفوريك (H_3PO_4) بتركيز 50%، مع اعتماد نسبة تشريب وزنية قدرها (2:1)، وذلك لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة الغرفة. بعد ذلك، تم تجفيف العينة في فرن التجفيف عند درجة حرارة $105^\circ C$ لمدة 24 ساعة، ثم أُجريت عملية الكربنة باستخدام فرن أنبوبي أفقي عند درجة حرارة $450^\circ C$ لمدة ساعة واحدة، مع معدل تسخين قدره $10^\circ C/d$. عقب ذلك، غُسلت العينات الناتجة عدة مرات بالماء المقطر الساخن ($50 - 60^\circ C$) إلى أن تم الوصول إلى رقم هيدروجيني $pH \approx [6-7]$. وأخيرًا، تم تجفيف العينات عند $105^\circ C$ ، ثم حُفظت في حاويات محكمة الإغلاق [3-5].



مخطط(II-1): البروتوكول التجريبي لتحضير الكربون النشط من قشور الرمان

4-II. تحضير المحاليل

تم في هذه التجربة تحضير محلول صبغة أزرق الميثيلين بتركيز 100 ملغ/ل. انطلاقاً من هذا المحلول الأم، حُضرت سلسلة من المحاليل المخففة بتركيزات تتراوح بين 1 و4 ملغ/ل. قيست الامتصاصية باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية عند طول موجي قدره 664 نانومترومن ثم تم رسم المنحنى القياسي.



الشكل (II - 1): محلول صبغة أزرق الميثيلين الأم

5-II. دراسة العوامل المؤثرة على الامتزاز

أجريت جميع تجارب عملية الامتزاز تحت نفس الظروف، حيث كانت درجة الحرارة ثابتة (درجة حرارة الغرفة)، وقيمة الأس الهيدروجيني (pH) ضمن المجال [6-7].

• تأثير جرعة الكربون النشط

تم أخذ كميات مختلفة من الكربون النشط المحضر، تراوحت بين 0.075 و0.175 غ، وأضيفت إلى 50 مل من محلول الصبغة بتركيز 20 ملغ/ل. بعد الرج المستمر لمدة 120 دُرُشت المحاليل.

أظهرت النتائج كفاءة كافة الكميات في عملية الامتزاز اعتماداً على الملاحظات البصرية وقياس الامتصاصية بواسطة مطيافية الأشعة فوق البنفسجية - المرئية. كما تم اختبار كمية قدرها 0.05 غ من الكربون النشط تحت نفس الظروف، وأعطت نفس النتائج.

بناءً على ذلك، تم اعتماد الكمية المثلى وهي 0.05 غ (أي ما يعادل جرعة 1 غ/ل) كجرعة ثابتة في الدراسات الموالية.

• تأثير زمن التلامس:

لتقييم حركية الامتزاز، حُضرت خمس عينات متماثلة (نفس الحجم والتركيز 20 ملغ/ل)، وأضيف إليها نفس كمية الكربون النشط. رُجت المحاليل لأزمنة متفاوتة (15، 30، 45، 60 و90 د)، ثم رُشحت وقُدرت الكميات الممتزة باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية.

• تأثير تركيز صبغة أزرق الميثيلين:

دُرس تأثير التركيز الأولي للصبغة عبر تحضير خمس محاليل بتراكيز تراوحت بين (10–50 ملغ/ل) أُضيف لكل منها 0.05 غ من الكربون النشط. رُجت المحاليل لمدة 60 د ثم رُشحت، وقُدر التركيز المتبقي بالاعتماد على منحنى المعايرة [3].



الشكل(II-2): صورة توضح المحاليل على جهاز الرج أثناء عملية الامتزاز

II-6. نمذجة إيزوتارم الامتزاز

لتحليل آليات الامتزاز، رُسمت العلاقة بين التركيز التوازني C_e والسعة الامتزازية q_e ، ثم طُبقت نماذج (لانغموير وفروندليش). تضمن التحليل حساب ثوابت النماذج والسعة القصوى للامتزاز وتم تمثيل النتائج بيانياً للحصول على المنحنيات المناسبة.

II-7. توصيف الكربون النشط المحضر

تم توصيف الكربون النشط المحضر باستخدام تقنيات تحليل متنوعة بهدف دراسة مورفولوجية السطح وتحديد التركيب العنصري والتعرف على المجموعات الوظيفية المسؤولة عن خصائصه الامتزازية.

• تحليل الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR):

استُخدمت هذه التقنية لدراسة المجموعات الوظيفية السطحية، حيث تم تسجيل أطياف الامتصاص لكلٍ من مسحوق قشور الرمان الخام، والكربون النشط المحضر (قبل وبعد الامتزاز)، ضمن المجال الطيفي من 4000 إلى 400 سم⁻¹.

• تحليل بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM/EDX):

تم الحصول على صور عالية الدقة للبنية السطحية لكل من مسحوق قشور الرمان الخام، والقشور المشربة بحمض الفوسفوريك، والكربون النشط المحضر قبل وبعد عملية الامتزاز، وذلك عند تكبيرات مختلفة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM). كما أجري تحليل نوعي وكمي للعناصر المكونة للعينات باستعمال مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX)، بهدف تحديد التركيب العنصري ومتابعة التغيرات التي طرأت على المادة خلال مراحل التحضير والامتزاز.

المراجع الأجنبية

- [1] Boutaleb Y., Zerdoum R., Bensid, N., Abumousa R. A., Hattab Z., & Bououdina M. Adsorption of Cr (VI) by mesoporous pomegranate peel biowaste from synthetic wastewater under dynamic mode. *Water*. 2022;14(23):3885.
- [2] Thamer B. M., Al-Aizari F. A., & Abdo H. S. Enhanced adsorption of textile dyes by a novel sulfonated activated carbon derived from pomegranate peel waste: isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Molecules*. 2023;28(23):7712.
- [3] Waghmare C., Ghodmare S., Ansari K., Alfaisal F. M., Alam S., Khan M. A., & Ezaier Y. Adsorption of methylene blue dye onto phosphoric acid-treated pomegranate peel adsorbent: Kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 2024; 318:100406.
- [4] Najjar-Souissi S., Saadi W., Zarroug M., & Ouederni A. Pomegranate Peels Activated Carbon by Phosphoric Acid Activation: Preparation, Characterization and Evaluation of Adsorptive Properties. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019;14(18): 6731-6741.
- [5] Lamine S. M., Ridha C., Mahfoud H. M., Mouad C., Lotfi B., & Al-Dujaili A. H. Chemical activation of an activated carbon prepared from coffee residue. *Energy Procedia*. 2014; 50:393-400.

الفصل الثالث

النتائج ومناقشتها

يتم في هذا الفصل عرض وتحليل النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها خلال دراسة كفاءة عملية الامتزاز لصبغة أزرق الميثيلين باستخدام الكربون النشط المحضر، مع توصيفه وظيفيا ومجهريا.

1-III. مردود الكربون النشط المحضر

من أجل تقليل تكاليف الإنتاج يجب أن تكون قيم إنتاجية عالية في إنتاج الكربون النشط، يمكن حساب المردود (%Rendement) بواسطة العلاقة التالية:

$$R\% = \frac{m_{AC}}{m_i}$$

حيث:

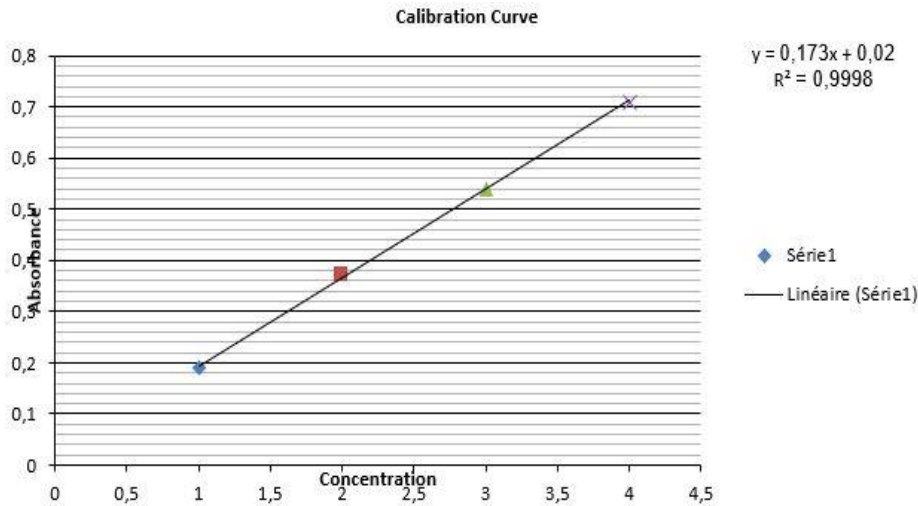
m_{AC} : وزن الكربون النشط المتحصل عليه.

m_i : وزن مسحوق قشور الرمان المستعمل.

$$R\% = \frac{7.3873}{10} \times 100 = 73.873\%$$

تثبت هذه النتيجة الجدى الاقتصادية العالية لاستغلال قشور الرمان كمادة أولية متوفرة ومنخفضة التكلفة لإنتاج كربون نشط يسمح بإمكانية الانتقال بالتجربة من النطاق المخبري إلى التطبيق الصناعي.

2-III. منحنى المعايرة لصبغة أزرق الميثيلين



الشكل (1-III): منحنى المعايرة لصبغة أزرق الميثيلين

نلاحظ أن القيم موافقة لقانون بير لمبير لأنها تشكل خط مستقيم.

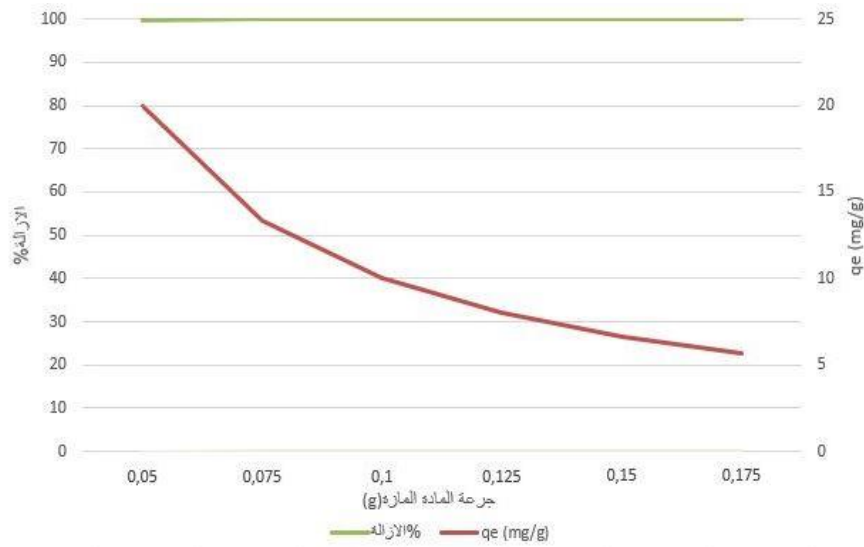
3-III. نتائج دراسة العوامل المؤثرة على الامتزاز

▪ تأثير جرعة الكربون النشط:



الشكل (III - 2): يوضح نتائج اختبار جرعة الكربون النشط لامتزاز صبغة أزرق الميثيلين

نلاحظ بوضوح اختفاء اللون الأزرق للصبغة تماما وتحول المحاليل إلى اللون الشفاف في جميع العينات بعد ترشيحها.



الشكل (III-3): منحنى تأثير جرعة الكربون النشط على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز

تأثير جرعة الكربون النشط على نسبة الإزالة

نلاحظ أن نسبة الإزالة تبقى مرتفعة جدًا وقريبة من 100% مهما ازدادت جرعة الكربون النشط وهذا يدل على أن الكربون النشط يمتلك عددًا كبيرًا من مواقع الامتزاز القادرة على إزالة معظم جزيئات أزرق الميثيلين من المحلول.

كما أن زيادة الجرعة توفر مساحة سطح أكبر وعددًا أكبر من المواقع الفعالة، مما يحافظ على كفاءة الإزالة مرتفعة.

تأثير جرعة الكربون على السعة الامتزازية q_e

نلاحظ أن السعة الامتزازية تنخفض تدريجياً عند زيادة جرعة الكربون النشط، حيث تنتقل تقريباً من:

19 ملغ/غ إلى حوالي: 5 ملغ/غ عند أعلى جرعة.

يفسر ذلك بأنه عند استعمال كمية صغيرة من الكربون تنتزع الصبغة على عدد قليل من الجسيمات لذلك يحمل كل غرام كمية كبيرة من الصبغة فتكون q_e مرتفعة. أما عند زيادة جرعة الكربون تصبح كمية الكربون كبيرة مقارنة بكمية الصبغة الموجودة فتتوزع الصبغة على عدد أكبر من المواقع وبالتالي تقل كمية الصبغة الممتزة لكل غرام من الكربون لذلك تنخفض q_e .

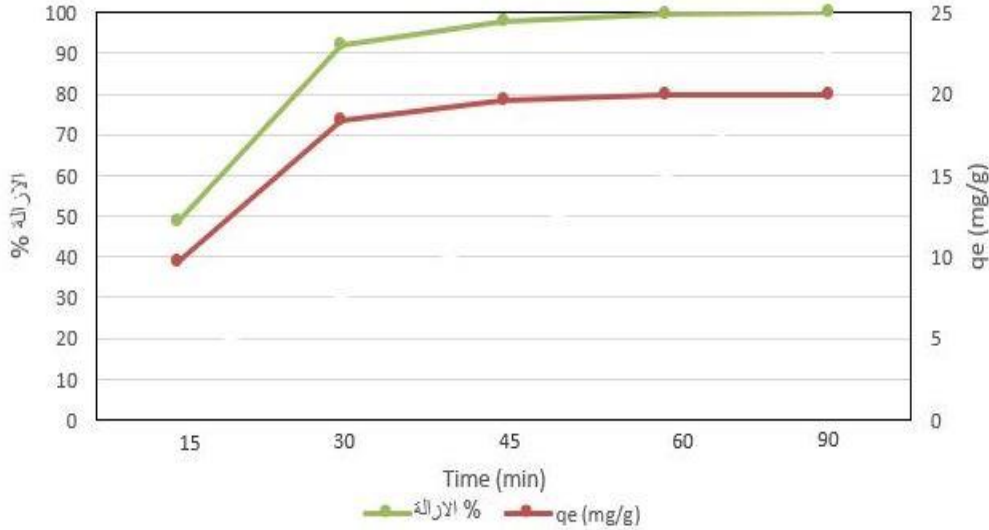
خلاصة القول إن زيادة جرعة الكربون النشط تحسن إزالة الصبغة وتحافظ على نسبة إزالة مرتفعة لكنها تؤدي إلى انخفاض السعة الامتزازية بسبب عدم استغلال جميع مواقع الامتزاز بشكل كامل وهذا يعني أن هناك جرعة مثلى من الكربون النشط تحقق توازناً بين: كفاءة الإزالة العالية والاستغلال الجيد للممتز.

▪ تأثير زمن التلامس



الشكل(III-4): يوضح نتائج اختبار زمن التلامس على امتزاز صبغة أزرق الميثيلين

تظهر الصورة تأثيراً واضحاً لزمن التلامس على عملية الامتزاز حيث نلاحظ انخفاض تدريجي في شدة اللون مع زيادة الزمن، كان داكن في البداية ثم بدأ يتلاشى تدريجياً عند 30 و 45 د ومع استمرار زيادة الزمن إلى 60 و 90 د أصبح المحلول عديم اللون تقريباً وهو ما يشير الوصول إلى حالة التوازن.



الشكل (III-5): منحنى تأثير زمن التلامس على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز

تأثير زمن التلامس على نسبة الإزالة

نلاحظ أن نسبة الإزالة ترتفع بسرعة كبيرة في بداية العملية: عند 15 د تكون حوالي 50% ثم ترتفع إلى حوالي 92% عند 30 د وبعد ذلك تصل تدريجياً إلى ما يقارب 100% ابتداءً من 60 د. نفسر ذلك بأنه في بداية الامتزاز يكون سطح الكربون النشط غنياً بالمواقع الفعالة والفارغة لذلك تنتقل جزيئات أزرق المثيلين بسرعة من المحلول إلى سطح الكربون فتكون سرعة الامتزاز مرتفعة جداً ومع زيادة زمن التلامس تزداد كمية الصبغة الممتزة فتتناقص المواقع الحرة تدريجياً إلى أن يقترب النظام من حالة التوازن، فتثبت نسبة الإزالة تقريباً.

تأثير زمن التلامس على السعة الامتزازية q_e

تزداد السعة الامتزازية تدريجياً مع الزمن: من حوالي 10 ملغ/غ عند 15 د إلى حوالي 18 ملغ/غ عند 30 د. ثم تبدأ تستقر قرب 20 ملغ/غ بعد 45 د. نفسر ذلك بأنه في البداية تكون مواقع الامتزاز متوفرة بكثرة لذلك يزداد تراكم جزيئات الصبغة بسرعة على السطح ثم مع مرور الزمن تمتلئ أغلب المواقع الفعالة فتتباطأ عملية الامتزاز تدريجياً وتصل q_e إلى قيمة شبه ثابتة تمثل سعة التوازن.

وابتداءً من حوالي: 45 د تصبح التغيرات في: نسبة الإزالة، والسعة الامتزازية ضعيفة جداً، مما يدل على الوصول إلى التوازن الامتزاز أي أن: عدد الجزيئات الممتزة على السطح \approx عدد الجزيئات التي تغادره. حيث تثبت انطلاقاً من 60 د.

بناء على ما سبق نستنتج أن زيادة زمن التلامس تؤدي إلى تحسين امتزاز أزرق المثيلين على الكربون النشط، حيث ترتفع كل من نسبة الإزالة والسعة الامتزازية بسرعة في البداية، ثم تستقران بعد الوصول

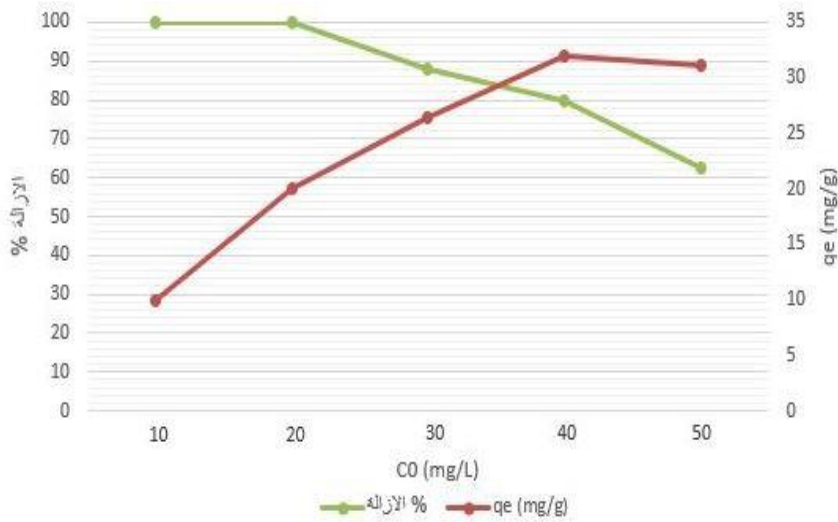
إلى زمن التوازن نتيجة تشبع معظم مواقع الامتزاز على سطح الكربون النشط بحيث قدر زمن التوازن بـ 60 د.

▪ تأثير تركيز صبغة أزرق الميثيلين



الشكل (III-6): يوضح نتائج اختبار التركيز الابتدائي على عملية الامتزاز

نلاحظ من الصورة أن المحاليل ذات التراكيز المنخفضة 10 و 20 ملغ/ل أصبحت شبه عديمة اللون، أما عند 30 و 40 ملغ/ل أصبح اللون أزرق فاتح في حين ظل اللون أكثر وضوحا عند 50 ملغ/ل نتيجة زيادة عدد جزيئات الصبغة مقارنة بعدد المواقع الفعالة المتاحة مما يؤدي تدريجيا إلى التشبع هذه المواقع.



الشكل (III-7): منحنى تأثير تركيز الصبغة الإبتدائي على نسبة الإزالة وسعة الامتزاز

ومن خلال البيان نلاحظ ما يلي:

تطور نسبة الإزالة (% إزالة)

عند التراكيز المنخفضة (10 – 20) ملغ/ل تبقى نسبة الإزالة مرتفعة جدًا وقريبة من 100%، وهذا يدل على أن مواقع الامتزاز الموجودة على سطح الكربون النشط كافية لاحتجاز معظم جزيئات الصبغة. لكن مع زيادة التركيز الابتدائي إلى 30، ثم 40 و 50 ملغ/ل، تبدأ نسبة الإزالة في الانخفاض التدريجي لتصل تقريبًا إلى 62.38 % عند 50 ملغ/ل.

يفسر ذلك بأن عدد مواقع الامتزاز على سطح الكربون النشط يصبح محدودًا مقارنة بعدد جزيئات الصبغة الموجودة في المحلول، مما يؤدي إلى تشبع السطح وعدم قدرة الممتز على إزالة كامل الكمية المضافة.

تطور السعة الامتزازية q_e

نلاحظ أن السعة الامتزازية تزداد تدريجيًا مع زيادة التركيز الابتدائي، حيث ترتفع من حوالي 10 ملغ/غ عند 10 ملغ/ل إلى حوالي 32 ملغ/غ عند 40 ملغ/ل.

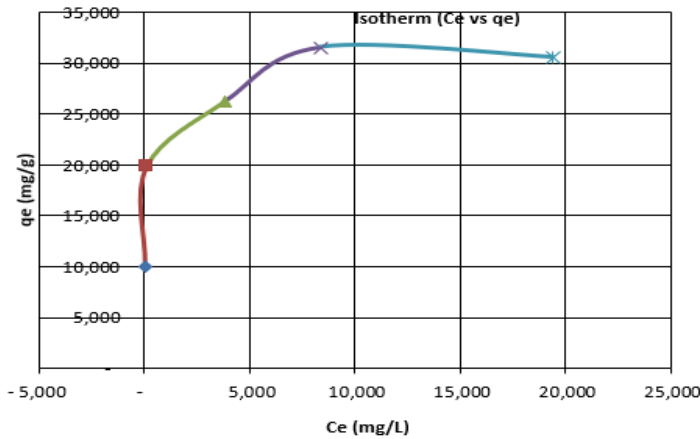
هذا يعني أن زيادة تركيز الصبغة تؤدي إلى انتقال كمية أكبر من جزيئات أزرق الميثيلين نحو سطح الكربون النشط، وبالتالي تزداد كمية المادة الممتزة لكل غرام من الممتز.

بعد 40 ملغ/ل تصبح السعة شبه ثابتة مع انخفاض طفيف عند 50 ملغ/ل، مما يدل على اقتراب تشبع مواقع الامتزاز ووصول النظام إلى السعة القصوى تقريبًا.

توضح النتائج أن الكربون النشط يمتلك كفاءة عالية في إزالة أزرق الميثيلين عند التراكيز المنخفضة، بينما تؤدي زيادة تركيز الصبغة إلى: انخفاض نسبة الإزالة بسبب تشبع مواقع الامتزاز وزيادة السعة الامتزازية نتيجة ارتفاع كمية الصبغة الممتزة لكل وحدة كتلة من الكربون.

إذن يمكن القول إن أفضل مردود للإزالة يتحقق عند التراكيز المنخفضة، في حين أن أعلى سعة امتزازية تتحقق عند التراكيز المرتفعة نسبيًا قبل الوصول إلى التشبع [1].

4-III. نتائج ايزوتارم الامتزاز



الشكل (8-III): منحنى ايزوتارم الامتزاز

يمثل البيان علاقة سعة الامتزاز q_e بدلالة التركيز المتبقي في التوازن C_e لامتزاز صبغة أزرق الميثيلين على الكربون النشط. يمكن تحليل المنحنى كما يلي:

يُلاحظ أن قيمة q_e تزداد بسرعة كبيرة عند القيم الصغيرة لـ C_e ، ثم يصبح الارتفاع تدريجيًا إلى أن يصل المنحنى إلى شبه استقرار عند القيم المرتفعة من التركيز.

هذا السلوك يدل على أن عملية الامتزاز تتم في البداية بسهولة كبيرة بسبب توفر عدد كبير من المواقع الفعالة على سطح الكربون النشط، ثم تقل سرعة الامتزاز مع امتلاء هذه المواقع.

المرحلة الأولى: الارتفاع السريع

عند التراكيز الصغيرة لـ C_e : ترتفع q_e من حوالي: 10 ملغ/غ إلى: 20 ملغ/غ بسرعة يدل ذلك على وجود عدد كبير من المواقع النشطة الحرة وتكون ألفة الصبغة لسطح الكربون مرتفعة جدًا في البداية، هذا يشير إلى كفاءة عالية للمادة الممتزة عند التراكيز المنخفضة.

المرحلة الثانية: الزيادة التدريجية

مع زيادة C_e : تستمر q_e بالارتفاع لكن بميل أقل، فيحدث تناقص تدريجي في عدد المواقع الفعالة المتاحة، تبدأ جزيئات الصبغة بالتنافس على المواقع المتبقية، في هذه المنطقة يصبح الامتزاز أبطأ مقارنة بالبداية.

الوصول إلى حالة التشبع

عند القيم المرتفعة لـ C_e : تصبح q_e شبه ثابتة حول 30 – 32 ملغ/غ يدل ذلك على اقتراب سطح الكربون من التشبع، فأغلب المواقع الفعالة أصبحت مشغولة بجزيئات الصبغة، إذن السعة القصوى للامتزاز تساوي تقريباً 31 ملغ/غ.

ملاحظة الانخفاض الطفيف في النهاية

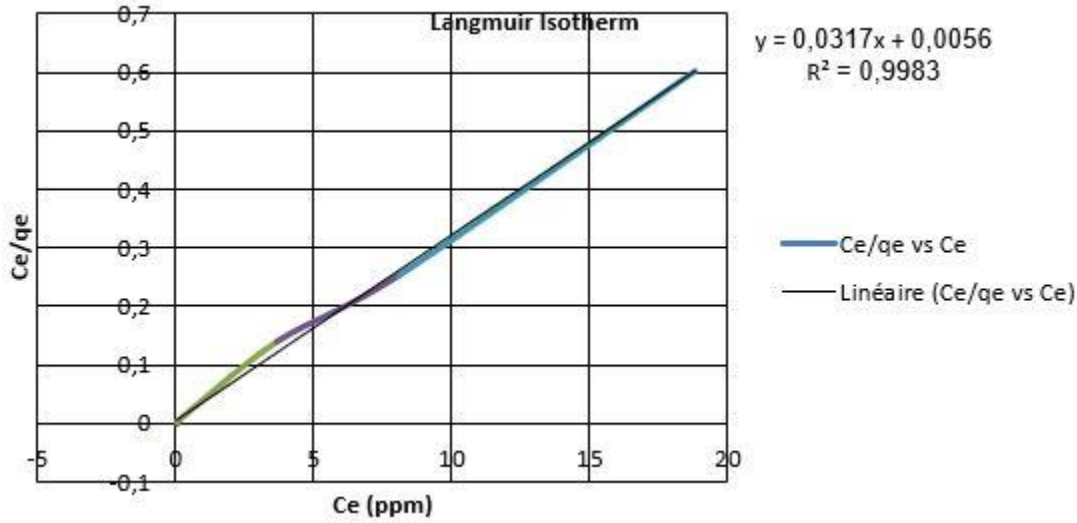
يظهر انخفاض بسيط جدًا في q_e عند أعلى قيمة لـ C_e ، ويمكن تفسيره بـ:

- أخطاء تجريبية بسيطة.
- عدم الوصول الكامل إلى التوازن.
- احتمال حدوث إزالة جزئية لبعض الجزيئات الممتزة عند التراكيز العالية جدًا.

لكن هذا الانخفاض غير كبير ولا يغيّر السلوك العام للمنحنى.

خلاصة القول يبين المنحنى أن الكربون النشط يمتلك قدرة جيدة على امتزاز صبغة أزرق الميثيلين، حيث ترتفع سعة الامتزاز بسرعة في البداية ثم تصل إلى قيمة قصوى تقارب 31 ملغ/غ، مما يدل على تشبع المواقع الفعالة ونجاح عملية الامتزاز.

• تطبيق نماذج الامتزاز على نتائج ايزوتارم الامتزاز



الشكل(III-9): مطابقة نموذج لانغموير على نتائج ايزوتارم الامتزاز

يمثل البيان الشكل الخطي لإيزوتارم لانغموير، حيث تم تمثيل العلاقة بين: C_e و C_e/q_e .

ويستخدم هذا التمثيل للتحقق مما إذا كانت عملية الامتزاز تتبع نموذج لانغموير.

يُلاحظ أن النقاط التجريبية تقع تقريبًا على خط مستقيم، كما أن خط الانحدار الخطي يمر قريبًا جدًا من جميع النقاط. هذا يدل على وجود توافق جيد بين النتائج التجريبية ونموذج لانغموير.

الصيغة الخطية لإيزوتارم لانغموير هي:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{max}K_L} + \frac{C_e}{Q_{max}}$$

تفسير الميل والجزء المقطوع من معادلة المستقيم: $y = ax + b$

• ميل المستقيم:

$$a = \frac{1}{Q_{max}}$$

• الجزء المقطوع من المحور y:

$$b = \frac{1}{Q_{max}K_L}$$

ومن خلالهما يمكن حساب:

• السعة القصوى للامتزاز Q_{max}

• ثابت لانغمير K_L

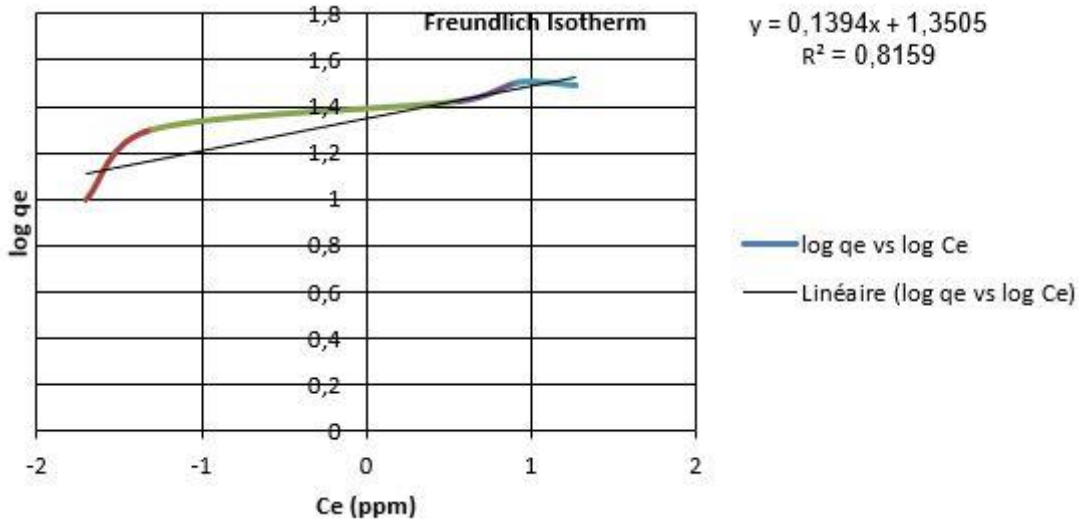
النتائج ممثلة في الجدول الموالي:

الجدول (1-III): ثوابت نموذج لانغموير

الميل (a)	نقطة التقاطع (b)	K_L	Q_{max}	R^2
0.0317	0.0056	5.66	31.51 mg/g	0.998

من نتائج الجدول أعلاه يتبين أن:

- الخطية الواضحة للبيان من خلال قيمة معامل الارتباط R^2 قريب جداً من 1.
 - القيمة المرتفعة نسبياً لـ Q_{max} التي تدل على أن الكربون النشط يمتلك قدرة جيدة على امتزاز صبغة أزرق الميثيلين.
 - القيمة الكبيرة لـ K_L تشير إلى وجود ألفة قوية بين الصبغة وسطح الكربون النشط، أي أن الامتزاز مفضل ويحدث بسهولة.
- بناءً على ماسبق فإن نموذج لانغموير يصف عملية الامتزاز بشكل ممتاز بمعنى:
- ❖ الامتزاز يحدث على سطح متجانس نسبياً.
 - ❖ جميع المواقع الفعالة تمتلك طاقة امتزاز متقاربة.
 - ❖ الامتزاز يتم على شكل طبقة أحادية (Monolayer adsorption).
 - ❖ كل موقع فعال يستقبل جزيئة واحدة فقط من الصبغة.
 - ❖ الامتزاز يتم بطريقة منتظمة ومنظمة على سطح الكربون النشط.
- من خلال التحليل السابق تبين أن امتزاز صبغة أزرق الميثيلين على الكربون النشط يتبع إيزوتارم لانغموير بدرجة جيدة، مما يدل على:
- تكوّن طبقة أحادية من الصبغة على السطح.
 - وجود عدد محدود من المواقع الفعالة.
 - تجانس نسبي لسطح المادة الممتزة.
 - امتلاك الكربون النشط قدرة امتزاز مرتفعة تجاه الصبغة.



الشكل (III-10): مطابقة نموذج فروندليش لنتائج ايزوتارم الامتزاز

يمثل البيان الشكل الخطي لإيزوتارم فروندليش، حيث تم تمثيل العلاقة بين: $\log C_e$ بدلالة $\log q_e$ ويُستخدم هذا التمثيل لدراسة مدى توافق عملية الامتزاز مع نموذج فروندليش. يُلاحظ أن النقاط التجريبية تتبع تقريبًا خطًا مستقيمًا، مع وجود انحرافات طفيفة عند بعض النقاط. هذا يدل على أن نموذج فروندليش يصف عملية الامتزاز بشكل مقبول. الصيغة الخطية لإيزوتارم فروندليش هي:

$$\log (q_e) = \log (K_F) + \frac{1}{n} \log (C_e)$$

النتائج ممثلة في الجدول الموالي:

الجدول (III - 2): ثوابت نموذج فروندليش

الميل (a)	نقطة التقاطع (b)	n	K_F	R^2
0.1394	1.3505	7.17	22.41	0.8159

من نتائج الجدول أعلاه يتبين أن:

- قيمة n المحصل عليها تبين أن الامتزاز ملائم جدًا (Favorable adsorption). وتوجد ألفة قوية بين أزرق المثيلين والكربون النشط لأنه كلما كانت $n > 1$ كان الامتزاز جيدًا.
- قيمة K_F المحصل عليها تدل على: قدرة امتزاز مرتفعة للكربون النشط وهناك قابلية جيدة لاحتجاز الصبغة على السطح.

بناءً على ما سبق فإن نموذج فروندليش يصف عملية الامتزاز بشكل مقبول بمعنى:

- ❖ سطح الكربون النشط غير متجانس.
- ❖ المواقع الفعالة تمتلك طاقات امتزاز مختلفة.
- ❖ الامتزاز يمكن أن يحدث على عدة طبقات (Multilayer adsorption).
- ❖ توجد تفاعلات متفاوتة القوة بين الصبغة والسطح وهذا طبيعي في المواد الكربونية المسامية.

من خلال التحليل السابق تبين أن امتزاز أزرق الميثيلين على الكربون النشط يتوافق مع نموذج فروندليش بدرجة مقبولة، مما يدل على:

- عدم تجانس سطح الكربون النشط.
 - وجود مواقع امتزاز مختلفة الطاقة.
 - إمكانية حدوث امتزاز متعدد الطبقات.
 - وامتلاك المادة قدرة امتزاز قوية وفعالة تجاه الصبغة.
- بالمقارنة بين قيم معامل الارتباط R^2 للنموذجين يتضح أن نموذج لانغموير هو الأكثر ملاءمة لوصف سلوك الامتزاز. وقيم معامل الاتزان L لانغموير R_L المحصورة بين 0.02 و 1 أن عملية الامتزاز مفضلة ما يؤكد أن الكربون النشط المحضر يمكنه امتزاز صبغة أزرق الميثيلين بفعالية.

III-5. دراسة تأثير الـ pH ودرجة الحرارة

قمنا باختيار منشورات علمية تصب في موضوع مذكرتنا

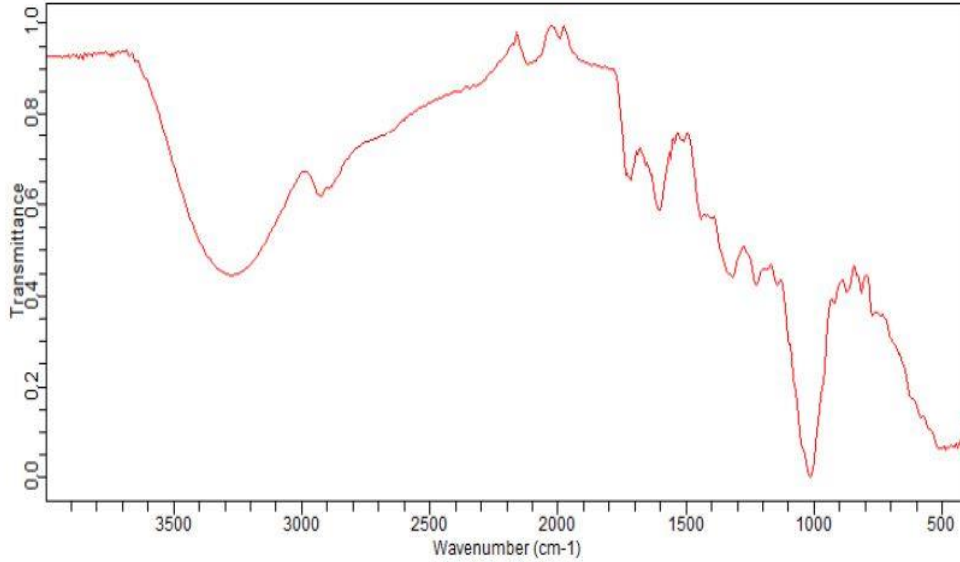
الجدول(III-3): نتائج دراسات سابقة حول تأثير pH ودرجة الحرارة على كفاءة امتزاز أزرق الميثيلين

المرجع	تأثير درجة الحرارة	تأثير pH	المواد الأولية	المجلة	عنوان المقال
[1]	مجال الدراسة من 293 إلى 307 كلفن أفضل قيمة لسعة الامتزاز سجلت عند 293 كلفن	مجال الدراسة من 2 إلى 10 أفضل قيمة امتزاز سجلت عند pH = 8	قشور الرمان حمض الفوسفوريك أزرق الميثيلين	Desalination and water Treatment	Adsorption of methylene blue dye onto phosphoric acid-treated pomegranate peel adsorbent: kinetic and thermodynamic studies
[2]	مجال الدراسة من 303 إلى 333 كلفن أفضل قيمة لسعة الامتزاز سجلت عند 303 كلفن	مجال الدراسة من 3 إلى 11 أفضل قيمة امتزاز سجلت عند pH = 11	قشور الرمان حمض الفوسفوريك أزرق الميثيلين	Desalination and water Treatment	Pomegranate peels collected from fresh juice shop as a renewable precursor for high surface area activated carbon with potential application for methylene blue adsorption
[3]	/	عند pH أكبر من 2.8 يصبح السطح سالب الشحنة مما يساعد على امتزاز الاصبغ الكاتيونية مثل: أزرق الميثيلين	قشور الرمان حمض الفوسفوريك أزرق الميثيلين	Engineering and Applied Sciences	Pomegranate peels activated carbon by phosphoric acid activation : preparation characterisation and evaluation of adsorptive properties

أظهرت كل الدراسات أن امتزاز أزرق الميثيلين على الكربون النشط المحضر من قشور الرمان والمنشط بحمض الفوسفوريك يزداد بارتفاع قيمة الرقم الهيدروجيني نتيجة التجاذب الكروستاتيكي، بينما تنخفض بزيادة درجة الحرارة مما يدل على أن عملية الامتزاز طاردة للحرارة.

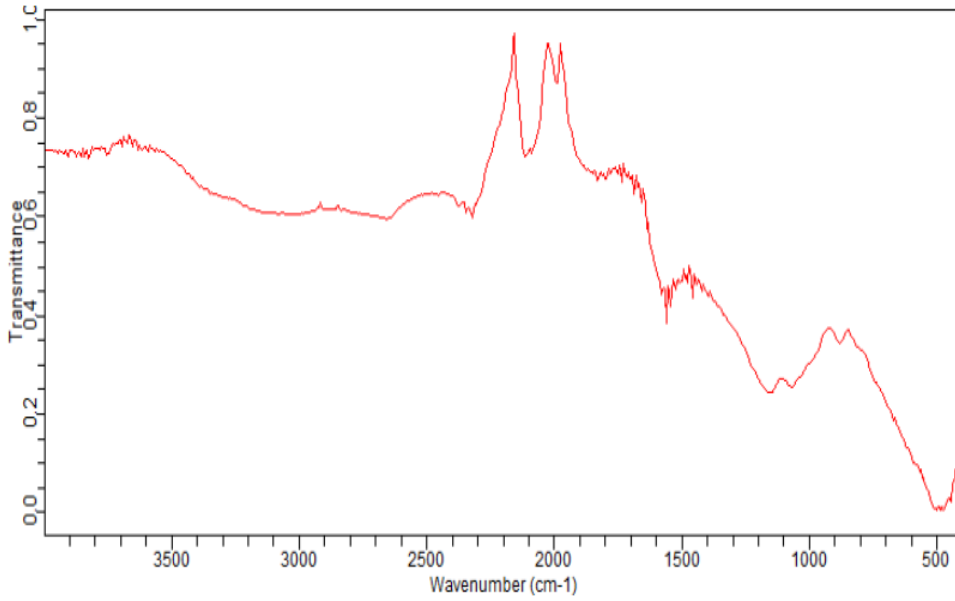
6-III. الخصائص الوظيفية والمورفولوجية للكربون النشط

• تحليل أطياف FTIR



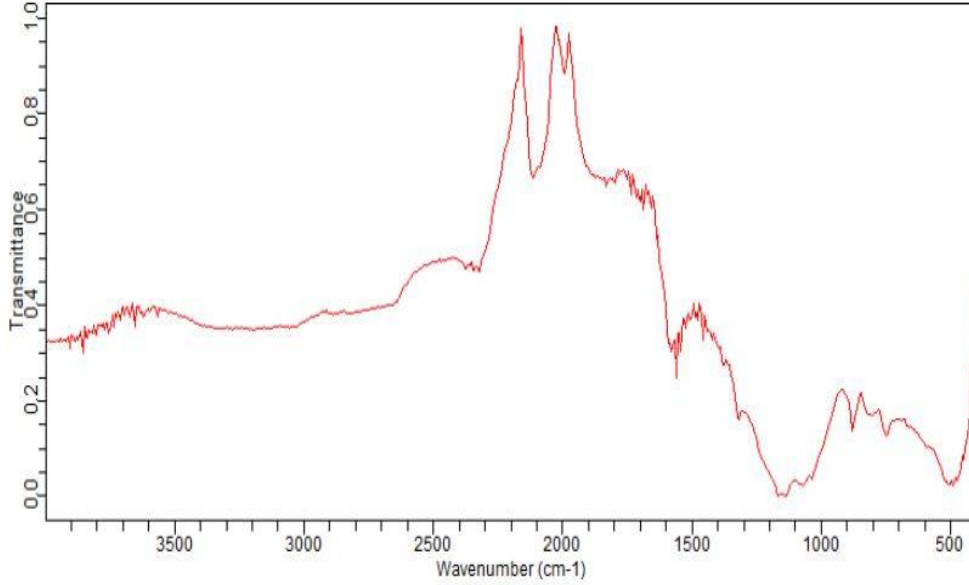
الشكل (11-III): طيف FTIR لمسحوق قشور الرمان الخام

أظهر طيف الأشعة تحت الحمراء لقمم عدة قمم مميزة تعكس الطبيعة اللجنوسليلوزية للمادة النباتية وثراءها بالمجموعات الوظيفية الفعالة. حيث ظهرت حزمة عريضة وقوية في المجال 3600 – 3200 سم⁻¹ تعزى إلى اهتزازات مجموعات الهيدروكسيل (OH) المرتبطة بالمركبات الفينولية والسليولوز والهيميسليولوز واللجنين. كما لوحظت قمم عند حوالي 2920 سم⁻¹ ناتجة عن اهتزازات روابط (C-H) الأليفاتية. وظهرت قمة قرب 1730 – 1700 سم⁻¹ مرتبطة باهتزازات مجموعة الكربونيل (C=O) الموجودة في الإسترات والأحماض الكربوكسيلية والمركبات الفينولية. كذلك سُجّلت قمم في المجال 1600 – 1500 سم⁻¹ تعود إلى الاهتزازات العطرية (C=C) الخاصة ببنية اللجنين، إضافة إلى قمم بين 1300 – 1000 سم⁻¹ مرتبطة باهتزازات روابط (C-O) للكحولات والإثيرات.



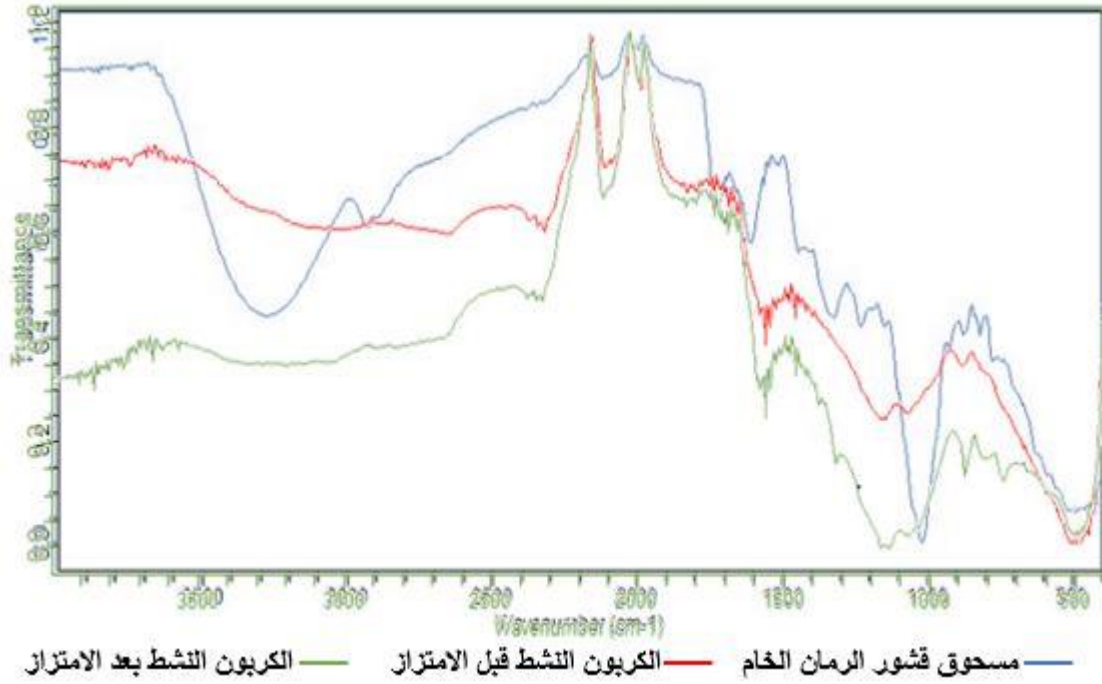
الشكل (12-III): طيف FTIR للكربون النشط قبل الامتزاز

بعد تحويل قشور الرمان إلى كربون نشط، لوحظ تغير واضح في طيف FTIR نتيجة عمليات الكربنة والتنشيط، حيث انخفضت شدة بعض القمم المرتبطة بالمركبات العضوية المتطايرة والسليولوز والهيميسليولوز بسبب التحلل الحراري لهذه المكونات. كما أصبحت القمم أكثر حدة وأقل عددًا، مما يدل على زيادة المحتوى الكربوني وتطور البنية العظمية للكربون النشط. ورغم ذلك، بقيت بعض المجموعات الوظيفية الأكسجينية مثل (OH) و (C=O) و (C-O) موجودة على سطح الكربون، وهو ما يمنحه مواقع فعالة لامتزاز الملوثات.



الشكل (13-III): طيف FTIR للكربون النشط بعد الامتزاز

بعد امتزاز صبغة أزرق الميثيلين على الكربون النشط المحضر من قشور الرمان، ظهرت تغيرات ملحوظة في الطيف تؤكد نجاح عملية الامتزاز. تمثلت هذه التغيرات في انخفاض شدة الحزمة العريضة الخاصة بـ (OH) مع حدوث انزياح نحو أعداد موجية أقل، مما يشير إلى مشاركة مجموعات الهيدروكسيل في تكوين روابط هيدروجينية مع جزيئات الصبغة. كما لوحظ تغير في موضع وشدة قمة (C = O)، وهو ما يدل على مساهمة مجموعات الكربونيل في عملية التثبيت السطحي للصبغة. إضافة إلى ذلك، ظهرت قمم جديدة أو ازدادت شدة بعض القمم في المجال 1400 – 1330 سم⁻¹ والمنسوبة إلى اهتزازات روابط (C-N) الخاصة بصبغة أزرق الميثيلين، مما يؤكد ارتباط جزيئات الصبغة بسطح الكربون النشط. كما تعززت القمم العطرية في المجال 1600 – 1500 سم⁻¹ نتيجة حدوث تأثيرات $\pi - \pi$ بين الحلقات العطرية للصبغة والبنية الغرافيتية للكربون النشط. تشير هذه النتائج إلى أن قشور الرمان تحتوي في الأصل على مجموعات وظيفية متعددة ساهمت بعد الكربنة والتنشيط في تكوين سطح نشط غني بالمواقع الفعالة للامتزاز، وأن إزالة صبغة أزرق الميثيلين تمت عبر عدة آليات متداخلة تشمل الروابط الهيدروجينية، والتجاذب الكهروستاتيكي والتأثيرات $\pi - \pi$ مما يبرز فعالية الكربون النشط المحضر من قشور الرمان في معالجة المياه الملوثة بالأصباغ العضوية[4].

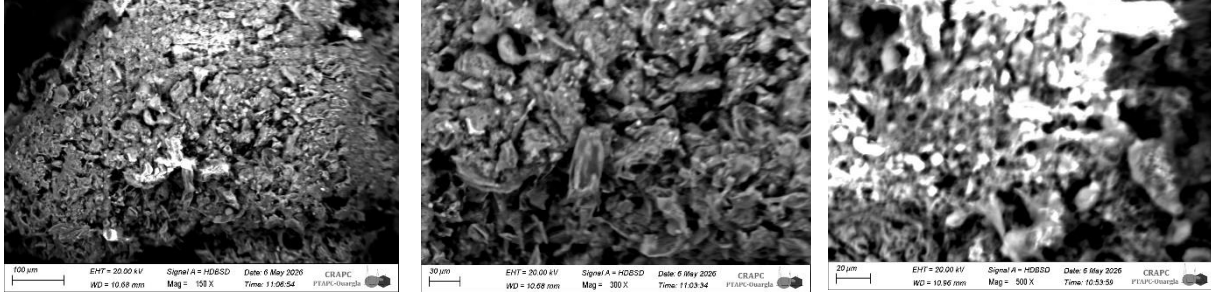


الشكل (14-III): مطابقة أطياف FTIR للعينات المدروسة

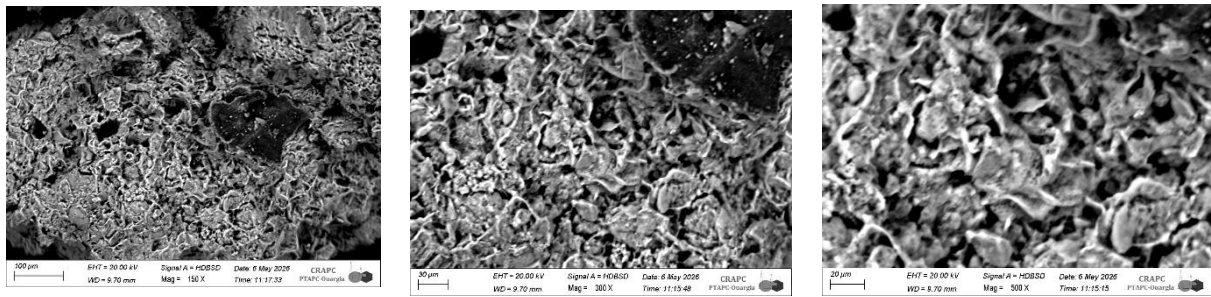
أكدت نتائج طيف FTIR الموضحة في الشكل نجاح تحويل قشور الرمان الخام إلى كربون نشط من خلال اختفاء الحزم الأليفاتية وظهور بنية عطرية متطورة غنية بالمجموعات الوظيفية الفوسفاتية والأكسجينية الناتجة عن التنشيط بحمض الفوسفوريك. كما أظهر الطيف بعد الامتزاز انخفاضاً وانزياحاً في شدة المجموعات الفعالة، مما يثبت حدوث تفاعل وتجاذب كيميائي وإلكتروستاتيكي فعال بين جزيئات صبغة أزرق الميثيلين والسطح المتجانس للكربون النشط، متوافقاً مع آلية الطبقة الأحادية التي فرضها نموذج لانغموير.

• التحليل بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح SEM/EDX

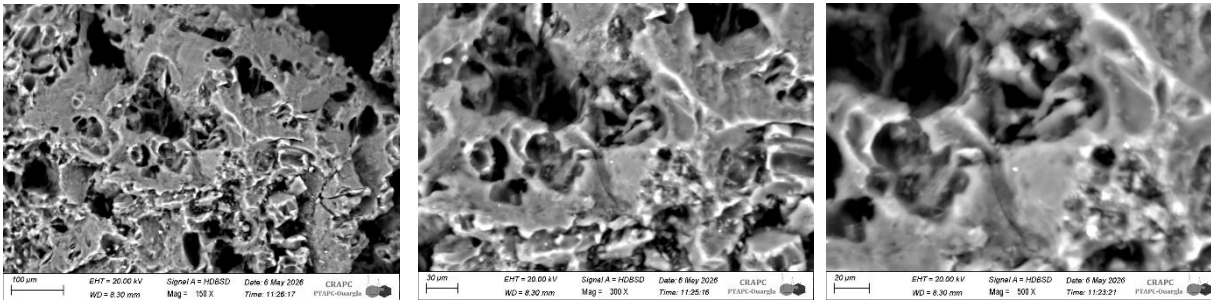
تم استخدام تقنية المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لدراسة التغيرات المورفولوجية التي طرأت على سطح مسحوق قشور الرمان الخام، والكربون النشط المحضّر (قبل وبعد الامتزاز).



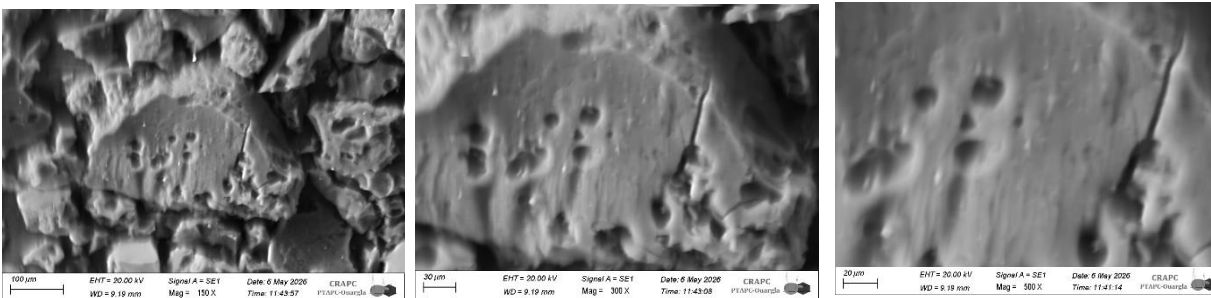
الشكل (III-15): صور بالماسح الإلكتروني لقشور الرمان الخام



الشكل (III-16): صور بالماسح الإلكتروني لقشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك



الشكل (III-17): صور بالماسح الإلكتروني للكربون النشط قبل الامتزاز



الشكل (III-18): صور بالماسح الإلكتروني للكربون النشط بعد الامتزاز

(1) أظهرت صور SEM الخاصة بقشور الرمان الخام الشكل (III-15) أن السطح يتميز ببنية غير منتظمة ومتراصة نسبياً مع وجود تكتلات ليفية ومناطق كثيفة ذات مسامية محدودة. كما لوحظ أن السطح يحتوي على عدد قليل من التجاويف والقنوات المغلقة، مما يشير إلى ضعف تطور البنية المسامية للمادة الخام. ويُعزى ذلك إلى وجود مكونات اللجنوسليلوز مثل السليلوز والهيميسليلوز واللجنين التي تعطي للمادة بنية متماسكة ومضغوطة نسبياً.

(2) في المقابل، أظهرت صور قشور الرمان المعالجة بحمض الفوسفوريك الشكل (III-16) تغيرات واضحة في البنية السطحية حيث أصبح السطح أكثر خشونة وتطورت شبكة مسامية واضحة تتضمن العديد من الثقوب والتجاويف والقنوات المفتوحة بأحجام مختلفة. كما لوحظ اختفاء جزء معتبر من التكتلات الموجودة في المادة الخام مع ظهور بنية إسفنجية غير منتظمة تدل على نجاح عملية التنشيط الكيميائي.

ويُفسّر هذا التغير البنوي بدور حمض الفوسفوريك في تحفيز التحلل الجزئي للمكونات العضوية وإزالة المواد المتطايرة أثناء عملية التثريب، مما أدى إلى فتح المسامات الداخلية وتكوين بنية عالية المسامية. كما يعمل الحمض على تعزيز تطور المساحة السطحية النوعية وتكوين مواقع فعالة جديدة على سطح المادة.

وتدل هذه النتائج على نجاح عملية المعالجة الكيميائية في تحسين الخصائص السطحية لقشور الرمان وهو ما يساهم في رفع كفاءة المادة المحضرة في تطبيقات الامتزاز، خاصة في إزالة الملوثات العضوية مثل صبغة أزرق الميثيلين، نتيجة زيادة عدد المواقع النشطة وسهولة انتقال الجزيئات نحو المسامات الداخلية للمادة الممتازة.

(3) تُظهر صور SEM الخاصة بالكربون النشط قبل الامتزاز الشكل (III-17) بنية سطحية غير منتظمة تتميز بدرجة عالية من المسامية، حيث تبدو المسامات والتجاويف موزعة بوضوح على سطح المادة. كما يُلاحظ وجود قنوات مفتوحة وشقوق عديدة بأحجام مختلفة، وهو ما يدل على نجاح عملية التنشيط الكيميائي في تطوير البنية المسامية للكربون النشط.

وتعكس هذه المسامات المتطورة زيادة المساحة السطحية النوعية للمادة، مما يوفر عددًا كبيرًا من المواقع النشطة القادرة على تثبيت جزيئات الملوثات أثناء عملية الامتزاز. كما أن خشونة السطح وعدم تجانسه يشيران إلى تكوين بنية كربونية فعالة ذات قدرة امتزازية مرتفعة.

ويُعزى ظهور هذه البنية المسامية إلى تأثير حمض الفوسفوريك أثناء عملية التنشيط، حيث يعمل على إزالة المواد المتطايرة وتفكيك المكونات اللجنوسليلوزية، مما يؤدي إلى فتح القنوات الداخلية وتكوين شبكة مسامية متطورة.

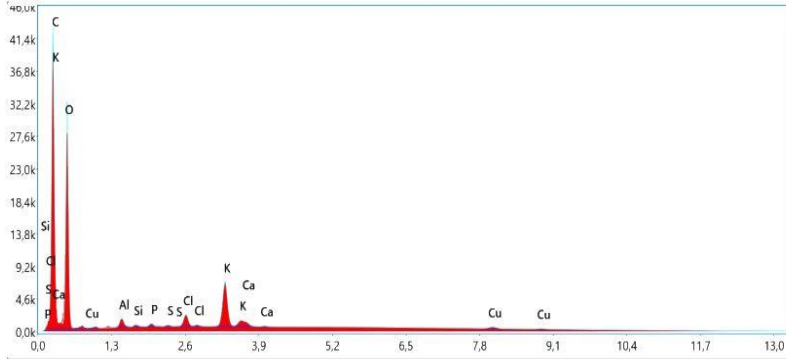
4) بعد عملية الامتزاز، تُظهر صور SEM الشكل (III-18) تغيرات واضحة في مورفولوجية سطح الكربون النشط مقارنة بالحالة قبل الامتزاز. إذ يُلاحظ انخفاض واضح في عدد المسامات المفتوحة مع ظهور انسداد جزئي لبعض التجاويف والقنوات، بالإضافة إلى أن السطح أصبح أكثر نعومة وأقل خشونة.

كما يمكن ملاحظة وجود ترسبات أو تجمعات على سطح المادة، والتي تُعزى إلى تثبيت جزيئات صبغة أزرق الميثيلين داخل المسامات وعلى المواقع النشطة للكربون النشط. ويشير هذا الانسداد الجزئي للمسام إلى نجاح عملية الامتزاز وحدث تفاعل فعال بين جزيئات الصبغة وسطح المادة الممتازة.

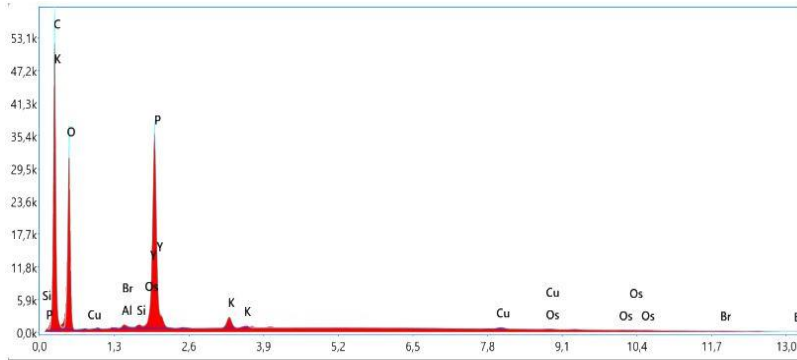
وتدل هذه النتائج على أن آلية الامتزاز تمت عبر انتشار جزيئات الصبغة داخل المسامات الداخلية وارتباطها بالمجموعات الوظيفية الموجودة على سطح الكربون النشط، مما أدى إلى تقليل المساحة السطحية المتاحة بعد الامتزاز.

تُظهر المقارنة بين الحالتين (قبل وبعد الامتزاز) أن الكربون النشط يتميز ببنية مسامية فعالة ساعدت على امتزاز صبغة أزرق الميثيلين بكفاءة. فقبل الامتزاز، كان السطح غنياً بالمسامات المفتوحة والقنوات، بينما بعد الامتزاز حدث انسداد جزئي لهذه المسامات نتيجة تثبيت جزيئات الصبغة. وتؤكد هذه التغيرات المورفولوجية نجاح عملية الامتزاز، كما تدعم النتائج التجريبية المتعلقة بكفاءة إزالة الصبغة. كما تشير إلى أن آلية الامتزاز تعتمد على كل من الامتزاز السطحي والانتشار داخل المسامات الدقيقة، مما يعكس فعالية الكربون النشط المحضر من قشور الرمان في تطبيقات معالجة المياه.

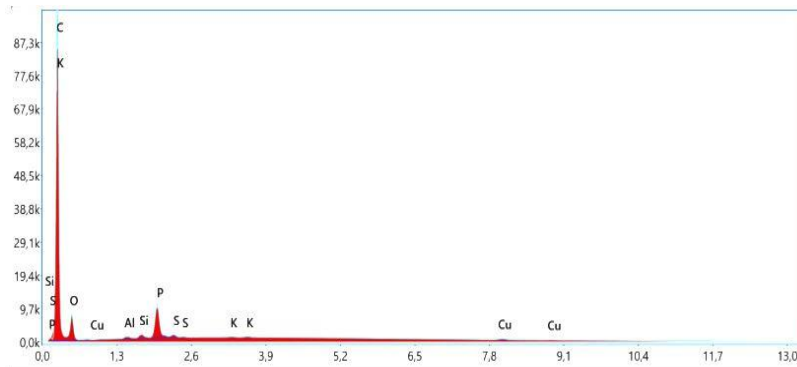
تبين أطياف EDX المرفقة التركيب العنصري لقشور الرمان الخام، قشور الرمان المعالجة بحمض الفوسفوريك والكربون النشط المحضر حيث تسمح هذه التقنية بتحديد العناصر الكيميائية الموجودة على سطح المادة وتقدير نسبها النسبية.



الشكل (III-19): طيف EDX لقشور الرمان الخام



الشكل (III-20): طيف EDX لقشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك



الشكل (III-21): طيف EDX للكربون النشط المحضر

الجدول (III-4): نسبة العناصر الكيميائية في العينات بواسطة EDX

الكربون (C)	الأكسجين (O)	الفوسفور (P)	
44.56%	47.12%	0.22%	قشور الرمان الخام
51.8%	35.38%	10.32%	قشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك
81.14%	13.18%	3.94%	الكربون النشط المحضر

في الشكل (III-19) الخاص بقشور الرمان الخام، تظهر قمم مرتفعة لكل من الكربون (C) والأكسجين (O)، وهو ما يؤكد الطبيعة العضوية للمادة النباتية واحتوائها على مركبات سليلوزية ولجنينية غنية بالمجموعات الأكسجينية. كما تظهر قمم ضعيفة لعناصر معدنية مثل البوتاسيوم (K) والكالسيوم (Ca) والسيليكون (Si) والكبريت (S) والألومنيوم (Al)، وهي ناتجة عن الأملاح والمعادن الطبيعية الموجودة في البنية النباتية لقشور الرمان. ويلاحظ كذلك وجود آثار للنحاس (Cu) قد تعود إلى شوائب أو إلى الحامل المعدني المستخدم أثناء التحليل.

أما في الشكل (III-20) الخاص بقشور الرمان المشربة بحمض الفوسفوريك، فيلاحظ استمرار هيمنة قمم الكربون والأكسجين، مع ظهور واضح وقوي لقمة الفوسفور (P)، مما يدل على نجاح عملية التشريب الكيميائي بحمض الفوسفوريك وارتباط مجموعات الفوسفات بسطح المادة. كما يمكن ملاحظة انخفاض نسبي في شدة بعض العناصر المعدنية مثل الكالسيوم والبوتاسيوم مقارنة بالعينة الخام، وهو ما يفسر حدوث إزالة جزئية للشوائب المعدنية أثناء المعالجة الكيميائية.

يشير ظهور الفوسفور إلى تكوين مجموعات فوسفاتية على السطح، وهي مجموعات فعالة تساهم في تحسين خصائص المادة المازة من خلال زيادة عدد المواقع النشطة وتطوير البنية المسامية. كما أن المعالجة بحمض الفوسفوريك تؤدي عادة إلى تعزيز المسامية وتسهيل تكوين بنية كربونية أكثر تطوراً مما ينعكس إيجاباً على كفاءة الامتزاز.

وعموماً، تؤكد نتائج EDX نجاح التعديل الكيميائي لقشور الرمان بحمض الفوسفوريك، مع حدوث تغير واضح في التركيب السطحي للمادة، الأمر الذي يدعم استخدامها كمادة أولية فعالة في تحضير الكربون النشط أو المواد المازة الموجهة لمعالجة الملوثات.

يبين الشكل (III-21) طيف EDX للكربون النشط المحضر انطلاقاً من قشور الرمان بعد المعالجة الكيميائية والتنشيط، حيث يسمح هذا التحليل بتحديد العناصر السطحية الموجودة وتقييم تأثير عملية التنشيط على التركيب الكيميائي للمادة.

يلاحظ من الطيف وجود قمة رئيسية وعالية الشدة لعنصر الكربون (C)، مما يدل على أن المادة المحضرة ذات طبيعة كربونية واضحة، وهو ما يؤكد نجاح عملية الكربنة والتنشيط في زيادة المحتوى الكربوني للمادة. كما تظهر قمة الأكسجين (O) بشدة أقل مقارنة بالكربون، ويرجع ذلك إلى وجود مجموعات وظيفية أكسجينية سطحية مثل مجموعات الهيدروكسيل والكربونيل والكربوكسيل، والتي تلعب دوراً مهماً في تحسين خواص الامتزاز والتفاعل مع الملوثات.

كما يلاحظ ظهور قمة الفوسفور (P) ، وهو ما يدل على بقاء آثار من حمض الفوسفوريك المستخدم في عملية التنشيط الكيميائي، إضافة إلى احتمال تشكل مجموعات فوسفاتية مرتبطة بالسطح الكربوني. وتعتبر هذه المجموعات عاملاً مهماً في تطوير البنية المسامية وزيادة المواقع النشطة على سطح الكربون النشط.

وتظهر كذلك قمم ضعيفة لبعض العناصر المعدنية مثل البوتاسيوم (K) والسيليكون (Si) والكبريت (S) والألمنيوم (Al) ، وهي عناصر متبقية من المادة النباتية الأصلية أو ناتجة عن الرماد المعدني بعد عملية الكربنة. كما أن انخفاض شدة هذه العناصر مقارنة بالعينة الخام يشير إلى فعالية المعالجة الكيميائية والحرارية في إزالة جزء كبير من الشوائب المعدنية والمركبات غير الكربونية.

ويلاحظ أيضاً وجود آثار طفيفة للنحاس (Cu) ، والتي قد تكون مرتبطة بالحامل المعدني المستخدم أثناء تحليل EDX أو بشوائب أثرية في العينة.

تُظهر المقارنة بين أطياف EDX لقشور الرمان الخام، والمشرّبة بحمض الفوسفوريك، والكربون النشط المحضّر، حدوث تغييرات واضحة في التركيب العنصري للمادة خلال مراحل المعالجة. فقد تميزت العينة الخام بوجود عناصر معدنية وطبيعية عضوية غنية بالكربون والأكسجين، بينما أدى التشريب بحمض الفوسفوريك إلى ظهور عنصر الفوسفور وانخفاض بعض الشوائب المعدنية. أما بعد التنشيط، فقد ازدادت شدة قمة الكربون بشكل ملحوظ مع تراجع العناصر غير الكربونية، مما يدل على نجاح عملية الكربنة والتنشيط في إنتاج كربون نشط غني بالكربون وذو سطح معدل بمجموعات فوسفاتية فعالة، وهو ما يعزز خصائصه الامتزازية وقدرته على إزالة الملوثات.

بصفة عامة، تؤكد نتائج EDX نجاح تحضير الكربون النشط من قشور الرمان، حيث أظهرت زيادة واضحة في المحتوى الكربوني مع وجود مجموعات سطحية حاوية للأكسجين والفوسفور، وهي خصائص تعزز من قدرة الكربون النشط على الامتزاز وتحسن من كفاءته في تطبيقات معالجة المياه وإزالة الملوثات العضوية.

المراجع الأجنبية

- [1] Waghmare C., Ghodmare, S., Ansari K., Alfaisal F. M., Alam S., Khan M. A., & Ezaier Y. Adsorption of methylene blue dye onto phosphoric acid-treated pomegranate peel adsorbent : Kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 2024; 318: 100406.
- [2] JAWAD Ali H., SAUODI, Muna Hasoon, MASTULI, Mohd Sufri, et al. Pomegranate peels collected from fresh juice shop as a renewable precursor for high surface area activated carbon with potential application for methylene blue adsorption. *Desalination and Water Treatment*. 2018 ; 124 : 287-296.
- [3] Najar-Souissi S., Saadi W., Zarroug M., & Ouederni A., Pomegranate Peels Activated Carbon by Phosphoric Acid Activation: Preparation, Characterization and Evaluation of Adsorptive Properties. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019;14(18): 6731-6741.
- [4] Boussaid R., Mimanne G., Mokdad H., Benhabib K., & Bezzina M. Physicochemical characterization of a pomegranate peel-based new adsorbent generation used in bisphenol a elimination. *Acta Periodica Technologica*. 2024; 189-202.

الخلاصة العامة

خلاصة عامة

بيّنت هذه الدراسة إمكانية تّمين المخلفات الزراعية وتحويلها إلى مواد ذات قيمة مضافة تخدم المجال البيئي، وذلك من خلال استغلال قشور الرمان وتحويلها إلى كربون نشط يُستخدم في تنقية المياه بعملية الامتزاز.

تم تحضير الكربون النشط بواسطة التنشيط الكيميائي لقشور الرمان، متبوعًا بعملية الكربنة عند درجة حرارة 450 °م في غياب الهواء لمدة ساعة واحدة. وقد أكدت نتائج التوصيف باستخدام تقنيات مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) مطيافية الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) نجاعة هذه العملية، من خلال التحقق من المجموعات الوظيفية وتطور مورفولوجيا السطح والمسامية.

ومن الناحية التطبيقية، أظهرت التجارب أن الكربون النشط المحضّر يمتلك قدرة عالية على إزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية، خاصة عند التراكيز المنخفضة حيث بلغت نسبة الإزالة 99% وسعة الامتزاز القصوى 31.51 ملغ/غ تحت الظروف المثلى للدراسة. كما بينت دراسة الاتزان أن نموذج لانغموير كان الأنسب لوصف سلوك الامتزاز، مما يدل على تشكل طبقة أحادية على سطح متجانس نسبيًا.

وبناءً على النتائج المتحصل عليها، يمكن اعتبار قشور الرمان سلائف اقتصادية واعدة لإنتاج كربون نشط وصديق للبيئة، مما يساهم في تّمين المخلفات الزراعية وتطوير حلول مستدامة لمعالجة المياه. كما يمكن مستقبلاً توسيع نطاق الدراسة ليشمل ملوثات أخرى، وتطبيق المادة المحضرة على مياه صرف حقيقية لتقييم فعاليتها تحت الظروف التطبيقية الفعلية، بالإضافة إلى دراسة حركية الامتزاز وآليات تجديد المادة المازة وإعادة استخدامها.

الملاحق

قيم منحني المعايرة لصبغة أزرق الميثيلين

التركيز (mg/l)	1	2	3	4
الامتصاصية	0.19	0.37	0.54	0.71

نتائج دراسة تأثير جرعة الكربون النشط على الامتزاز

جرعة المادة المازة (mg)	C_e (mg/l)	q_e (mg/g)	% الإزالة
0.05	0.017	19.98	99.92
0.075	0.015	13.32	99.93
0.1	0.013	9.99	99.94
0.125	0.013	7.99	99.94
0.15	0.011	6.66	99.945
0.175	0.01	5.71	99.95

نتائج دراسة تأثير زمن التلامس على الامتزاز

زمن التلامس (min)	C_e (mg/l)	q_e (mg/g)	% الإزالة
15	10.26	9.74	48.7
30	1.62	18.38	91.88
45	0.41	19.6	97.98
60	0.05	19.95	99.74
90	0.01	19.99	99.94

نتائج دراسة تأثير التركيز الابتدائي للصبغة على الامتزاز

التركيز الابتدائي للصبغة (mg/l)	C_e (mg/l)	q_e (mg/g)	% الإزالة
10	0.02	9.88	99.8
20	0.05	19.95	99.75
30	3.66	26.34	87.79
40	8.11	31.89	79.73
50	18.81	31.19	62.38

قيم متغيرات نماذج لانغموير وفرندليش لامتزاز الصبغة على الكربون النشط

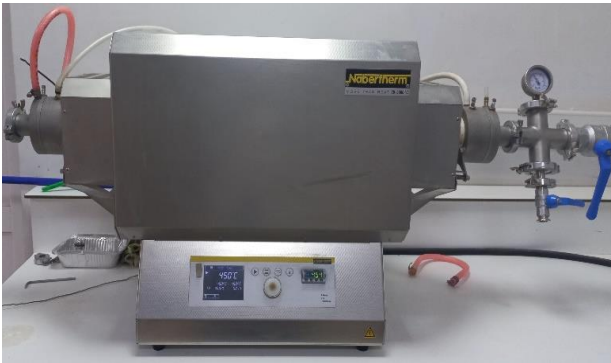
C_e/q_e	0.002	0.003	0.139	0.254	0.603
R_L	0.02	0.05	1	1	0.13
$\log C_e$	-1.7	-1.3	0.56	0.91	1.27
$\log q_e$	0.99	1.3	1.42	1.5	1.49



آلة النخل



المطحنة الكهربائية



فرن أنبوبي أفقي



فرن التجفيف



جهاز مطيافية الاشعة تحت الحمراء



جهاز مطيافية الاشعة فوق البنفسجية-المرئية



ميزان تحليلي



جهاز المجهر الالكتروني الماسح

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تثمين قشور الرمان وتحويلها إلى كربون نشط منخفض التكلفة باستعمال التنشيط الكيميائي بحمض الفوسفوريك، ودراسة كفاءته في إزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية. تم توصيف المادة المحضرة باستخدام تقنيات (FTIR) و (SEM) و (EDX)، حيث أكدت النتائج نجاح عملية التحضير من خلال وجود مجموعات وظيفية فعالة، تطور البنية المسامية وارتفاع المحتوى الكربوني. كما تمت دراسة تأثير بعض العوامل المؤثرة على عملية الامتزاز، مثل جرعة الكربون النشط وزمن التلامس والتركيز الابتدائي للصبغة. أظهرت النتائج كفاءة عالية في إزالة أزرق الميثيلين، حيث بلغت نسبة الإزالة 99% وسعة الامتزاز القصوى 31.51 ملغ/غ. كما بينت دراسة الإيزوتارم توافقاً جيداً مع نموذج لانغموير ($R^2 = 0.998$)، مما يدل على ملائمة الكربون النشط المحضر لعملية الامتزاز. تؤكد هذه النتائج أن الكربون النشط المحضر من قشور الرمان يمثل مادة مازة فعالة ومنخفضة التكلفة وصديقة للبيئة، ويمكن استخدامه في معالجة المياه وإزالة الملوثات العضوية.

الكلمات المفتاحية: قشور الرمان، الكربون النشط، التنشيط الكيميائي، الامتزاز، أزرق الميثيلين، معالجة المياه.

Abstract

This work aims to valorize pomegranate peels by converting them into low-cost activated carbon through chemical activation with phosphoric acid and evaluating its efficiency in the removal of methylene blue dye from aqueous solutions. The prepared material was characterized using FTIR, SEM, and EDX techniques. The results confirmed the successful preparation of activated carbon through the presence of active functional groups, the development of a porous structure, and an increase in carbon content.

The effects of several factors affecting on the adsorption process were also investigated, including activated carbon dosage, contact time, and initial dye concentration. The results demonstrated a high removal efficiency for methylene blue with a removal rate of 99% and a maximum adsorption capacity of 31.51 mg/g. Adsorption isotherm studies showed a good fit with the Langmuir model ($R^2 = 0.998$) indicating the suitability of the prepared activated carbon for the adsorption process.

These findings confirm that activated carbon derived from pomegranate peels is an effective, low-cost, and environmentally friendly adsorbent that can be used for water treatment and the removal of organic pollutants.

Keywords : Pomegranate peels, Activated carbon, Chemical activation, Adsorption, Methylene blue, Water treatment.